

MATERIAIS DE MUDANÇA DE FASE (PCM) ABSORÇÃO SONORA DO RT 18

RUI FILIPE DA MOTA TEIXEIRA

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM CONSTRUÇÕES

Orientadora: Professora Doutora Ana Margarida Vaz Duarte Oliveira e
Sá

Coorientadora: Ana Sofia Moreira dos Santos Guimarães Teixeira

JUNHO DE 2019

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2018/2019

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2018/2019 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2019.*

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

Aos meus Pais

“Grandes atos são feitos de pequenas atitudes.”

Lao Tsé

AGRADECIMENTOS

Ao concluir esta dissertação gostaria de expressar os meus sinceros agradecimentos a todos os que tornaram possível a sua realização.

À Professora Doutora Ana Vaz Sá, orientadora desta dissertação, que me acompanhou ao longo de todo o semestre disponibilizando a sua ajuda no conhecimento científico bem como a motivação e positivismo transmitidos.

À coorientadora Ana Sofia Guimarães que disponibilizou a sua ajuda quando foi necessário.

Ao engenheiro António Eduardo Costa pela disponibilidade e acompanhamento no processo laboratorial.

Aos meus pais pelo apoio incessante e por terem proporcionado todas as condições que permitiram estudar e concluir esta etapa.

Aos meus amigos que ao longo destes anos de estudo estiveram presentes na resolução dos mais diversos problemas, motivando-me para que conseguisse finalizar esta jornada da minha vida.

À minha namorada por todo o apoio e por ter sempre acreditado em mim na realização deste trabalho.

Finalmente à minha família por pequenos conselhos dados e ajuda a nível motivacional e não só.

RESUMO

Nos dias de hoje, as edificações existentes representam uma parte significativa do problema energético e da crise ambiental. Nesta medida começam a surgir, no sector da construção, os materiais de mudança de fase (PCM) que possuem a capacidade de armazenamento de calor, na forma de calor latente. A sua propriedade de mudança de estado em temperaturas na gama das temperaturas de conforto permite que este material uniformize as temperaturas das superfícies interiores dos edifícios e assim aumente a sensação de conforto.

Neste trabalho apresentam-se exemplos de casos de PCM aplicados em edifícios onde funcionam como sistemas passivos para aquecimento e arrefecimento de edifícios. O recurso a sistemas passivos e a elevada capacidade de armazenamento de calor dos PCM permite a diminuição do consumo de energia.

O trabalho laboratorial desenvolvido surge de forma a caracterizar PCM numa área ainda não desenvolvida, a acústica. O recurso ao ensaio do tubo de ondas estacionárias permitiu determinar o coeficiente de absorção sonora e assim possibilitar a caracterização desta propriedade acústica do PCM. As análises finais e a comparação dos resultados obtidos nos ensaios com outros materiais utilizados correntemente na construção possibilitam o enquadramento das suas características acústicas bem como o desafio para a exploração desta temática.

PALAVRAS-CHAVE: PCM, armazenamento de calor, sistemas passivos, consumo de energia, coeficiente de absorção sonora.

ABSTRACT

Nowadays, buildings represent an important part of the energy problem and the environmental crisis. Therefore, it has begun to emerge in the construction sector, phase change materials (PCM) that have a heat storage capacity, in the form of latent heat. Its capacity to change states in the comfort temperature range allows this material to uniform the temperature in the interior surfaces of buildings and therefore increase the feeling of comfort.

In this work are presented examples of PCM cases, which are executed as passive systems for heating and cooling of buildings. The use of passive systems and the high heat storage capacity of PCMs allows the reduction of energy consumption.

The laboratory work developed appears as a way to describe PCM in an area not yet developed, acoustic. The use of a stationary wave tube test allowed to determine the coefficient of sound absorption and thereby allows a characterization of this acoustic property of PCM. The final analysis and the comparison of the results obtained in the tests with other materials currently used in construction allowed the framing of its acoustic characteristics as well as a challenge for the development of this theme.

KEYWORDS: PCM, heat storage, passive systems, energy consumption, coefficient of sound absorption.

ÍNDICE GERAL

| | |
|----------------------|-----|
| AGRADECIMENTOS | i |
| RESUMO | iii |
| ABSTRACT | v |

1 INTRODUÇÃO

| | |
|---|---|
| 1.1. ENQUADRAMENTO | 1 |
| 1.2. OBJETIVOS | 2 |
| 1.3. APRESENTAÇÃO DO CONTEÚDO DA TESE | 2 |

2 ESTADO DA ARTE–MATERIAL DE MUDANÇA DE FASE ...

| | |
|---|----|
| 2.1. PCM - INTRODUÇÃO | 5 |
| 2.2. DEFINIÇÕES E CONCEITOS | 7 |
| 2.3. PCM: PROPRIEDADES, CLASSES, CATEGORIAS | 10 |
| 2.4. MATERIAIS DE MUDANÇA DE FASE COM APLICAÇÃO NO INTERIOR DOS EDIFÍCIOS | 13 |
| 2.5. INCORPORAÇÃO DE PCM EM MATERIAIS OU COMPONENTES DA CONSTRUÇÃO | 15 |
| 2.5.1. INTRODUÇÃO | 15 |
| 2.5.2. IMPREGNAÇÃO | 15 |
| 2.5.3. IMERSÃO | 15 |
| 2.5.4. ENCAPSULAMENTO | 16 |
| 2.6. MATERIAIS E COMPONENTES DA CONSTRUÇÃO COM PCM | 17 |
| 2.6.1. GESSO CARTONADO | 17 |
| 2.6.2. ELEMENTOS À BASE DE BETÃO | 18 |
| 2.6.3. PAREDES DE TROMBE | 18 |
| 2.6.4. BLOCOS DE BETÃO OU TIJOLO | 19 |
| 2.6.5. TETOS FALSOS | 19 |
| 2.6.6. PAVIMENTOS RADIANTES | 20 |

3 APLICAÇÕES DO PCM EM EDIFÍCIOS E SEU DESEMPENHO TÉRMICO

| | |
|---|----|
| 3.1. INTRODUÇÃO | 21 |
| 3.2. ARREFECIMENTO PASSIVO EM EDIFÍCIOS | 21 |
| 3.3. AQUECIMENTO PASSIVO EM EDIFÍCIOS | 25 |

| | |
|---|----|
| 4 ESTUDO EXPERIMENTAL | 29 |
| 4.1. INTRODUÇÃO | 29 |
| 4.2. ABSORÇÃO SONORA | 29 |
| 4.3. MÉTODOS DE DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE ABSORÇÃO SONORA | 30 |
| 4.3.1. INTRODUÇÃO | 30 |
| 4.3.2. O MÉTODO DO TUBO DE ONDAS ESTACIONÁRIAS | 31 |
| 4.3.3. CÁLCULO DO COEFICIENTE DE ABSORÇÃO SONORA | 31 |
| 4.4. PROCEDIMENTO LABORATORIAL EXPERIMENTAL | 33 |
| 4.4.1. INTRODUÇÃO | 33 |
| 4.4.2. CÁLCULO DO COEFICIENTE DE ABSORÇÃO | 34 |
| 4.5. ANÁLISE DE RESULTADOS | 41 |
| 4.5.1. INTRODUÇÃO | 41 |
| 4.5.2. COMPARAÇÃO DO PCM ENSAIADO COM MATERIAIS ACÚSTICOS UTILIZADOS NA CONSTRUÇÃO | 42 |
| 4.5.3. COMPARAÇÃO DO PCM ENSAIADO COM MATERIAIS CORRENTES UTILIZADOS NA CONSTRUÇÃO .. | 44 |
| 4.6. SÍNTESE CRÍTICA | 45 |
| 5 CONCLUSÕES | 47 |
| 5.1. CONCLUSÕES GERAIS | 47 |
| 5.2. SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS | 48 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 49 |
| ANEXOS | 52 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1 – Gráfico com a comparação da capacidade de armazenamento de calor de alguns materiais correntes na construção | 5 |
| Figura 2 – Fenômenos de absorção e liberação de energia decorrentes das mudanças de estado físico do PCM (UCDAVIS 2019) | 6 |
| Figura 3 – Coesão molecular da água nos diferentes estados físicos (ebah 2019)..... | 9 |
| Figura 4 – Gráfico com as quantidades de energia sob forma de calor utilizada pela água nas mudanças de estado (Sá, A.M.V., 2013)..... | 9 |
| Figura 5 – Diferentes categorias dos PCM (adaptado Sá, A.M.V., 2013) | 10 |
| Figura 6 – Distribuição dos PCM com a temperatura de fusão de acordo com a entalpia de fusão (Sá, A.M.V., 2013)..... | 11 |
| Figura 7 – Macrocapulas com PCM incorporado (BASF 2019) | 16 |
| Figura 8 – Placas de gesso cartonado com PCM incorporado (BASF 2019)..... | 17 |
| Figura 9 – Esquema construtivo de uma parede de trombe (Gonçalves, R.R., 2015) | 18 |
| Figura 10 – Esquema de tijolo cerâmico com PCM macroencapsulado adaptado de (Alawadhi, E.M., 2008). | 19 |
| Figura 11 – Princípio de funcionamento de um teto falso com PCM durante o dia (Tyagi, V.V. and Buddhi, D., 2007). | 20 |
| Figura 12 - Princípio de funcionamento de um teto falso com PCM durante a noite (Tyagi, V.V. and Buddhi, D., 2007). | 20 |
| Figura 13 – Esquema construtivo de um pavimento radiante contendo PCM (Sá, A.M.V., 2013). | 20 |
| Figura 14 – Esquemas construtivos de paredes com e sem PCM de uma sala de testes (Kuznik, Virgone e Roux, 2008)..... | 22 |
| Figura 15 – Cobertura de em metal tradicional (Chou, Chen e Nguyen, 2013) | 22 |
| Figura 16 – Novo design da estrutura de telhados de placa de metal (Chou, Chen e Nguyen, 2013) | 22 |
| Figura 17 – Esquema construtivo de uma parede com a solução MECILDE (Álvarez et al. 2013) | 23 |
| Figura 18 – Recipientes cilíndricos contendo PCM na câmara de ar (Álvarez et al., 2013)..... | 23 |
| Figura 19 – Modo “dia” com a recirculação do ar quente (Álvarez et al., 2013)..... | 23 |
| Figura 20 – Períodos inativos com as entradas de ar fechadas (Álvarez et al., 2013) | 24 |
| Figura 21 – Modo “noite” com a circulação do ar (Álvarez et al., 2013) | 24 |
| Figura 22 – Esquema construtivo de um ladrilho grés rústico contendo PCM (Cerón, Neila e Khayet, 2011) | 25 |
| Figura 23 – Gráficos com as temperaturas horárias nas superfícies dos ladrilhos com e sem PCM num dia de Inverno (Cerón, Neila e Khayet, 2011)..... | 26 |
| Figura 24 – Esquema construtivo de uma cortina de vidro contendo PCM (Park et al., 2019) | 27 |

| | |
|---|----|
| Figura 25 – Resultados da poupança de energia apresentado pelos dois edifícios para os três locais em análise (Park et al.,2019) | 28 |
| Figura 26 – Esquema ilustrativo da energia sonora a incidir num material | 29 |
| Figura 27 – Ilustrações das medições de pressão e distância a realizar no ensaio do Tubo de Ondas Estacionárias (Martins G.V.C.P. 2008) | 31 |
| Figura 28 – Equipamentos utilizados no ensaio laboratorial | 34 |
| Figura 29 – Funcionamento do ensaio experimental do Tubo de Ondas Estacionárias | 34 |
| Figura 30 – Tubos utilizados nos ensaios para as medições das diferentes frequências sonoras | 35 |
| Figura 31 – Amostras do PCM RT 18HC utilizados nos ensaios | 37 |
| Figura 32 – Valores dos coeficientes de absorção sonora obtidos no ensaio 1 | 38 |
| Figura 33 - Valores dos coeficientes de absorção sonora obtidos no ensaio 2 | 39 |
| Figura 34 - Valores dos coeficientes de absorção sonora obtidos no ensaio 3 | 40 |
| Figura 35 - Valores dos coeficientes de absorção sonora obtidos no ensaio | 40 |
| Figura 36 - Valores dos coeficientes de absorção sonora obtidos no ensaio 5 | 40 |
| Figura 37 – Comparação dos coeficientes de absorção sonora obtidos nos cinco ensaios | 41 |
| Figura 38 - Média dos coeficientes de absorção sonora obtidos nos ensaios 3,4 e 5 | 42 |
| Figura 39 – Gráfico de comparação dos coeficientes de absorção sonora do PCM estudado com materiais acústicos | 43 |
| Figura 40 - Gráfico de comparação dos coeficientes de absorção sonora do PCM estudado com materiais correntes na construção | 45 |

ÍNDICE DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1 - Tabela com a comparação de parâmetros térmicos entre os PCM e materiais correntes na construção | 8 |
| Tabela 2 – Principais características associadas aos PCM e suas vantagens e desvantagens | 12 |
| Tabela 3 – Propriedades decisivas na escolha de um PCM | 13 |
| Tabela 4 – Materiais de mudança de fase adequados à aplicação na construção | 13 |
| Tabela 5 - Materiais de mudança de fase adequados à aplicação na construção | 14 |
| Tabela 6 – Resultados das quatro soluções analisadas..... | 25 |
| Tabela 7 – Composição das paredes dos edifícios estudados..... | 27 |
| Tabela 8 – Dimensões dos tubos utilizados nos ensaios | 35 |
| Tabela 9 – Cálculos realizados para a escolha do tubo de acordo com a frequência sonora a ser ensaiada | 35 |
| Tabela 10 – Valores das pressões registados pelo sonómetro no ensaio 1 | 37 |
| Tabela 11 - Valores das pressões registados pelo sonómetro no ensaio 2 | 38 |
| Tabela 12 - Valores das pressões registados pelo sonómetro nos ensaios 3,4 e 5 | 39 |
| Tabela 13 – Dados recolhidos com os coeficientes de absorção sonora de materiais acústicos | 43 |
| Tabela 14 – Dados recolhidos dos coeficientes de absorção sonora de materiais correntes na construção..... | 44 |

SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS

λ - condutibilidade térmica [W/(m.K)]

c_p - calor específico [J/(kg.K)]

C - calor específico volumétrico [kJ/(m³.K)]

α_T - difusibilidade térmica [m²/s]

\emptyset - capacidade de armazenamento de calor [kJ/kg]

T - temperatura [°C]

ρ - massa volúmica [kg/m³]

H - entalpia [J/kg]

L - calor latente [J]

T - temperatura [°C]

T_1 - temperatura de fusão [°C]

t - tempo [s]

α_r - coeficiente de reflexão sonora

α_θ - coeficiente de absorção sonora

f - Frequência [Hz]

p_{\min} - pressão mínima [dB]

p_{\max} - pressão máxima [dB]

$x_{\min 1}$ - distância mínima [cm]

l - comprimento do tubo [m]

λ_0 - comprimento de onda [m]

d - diâmetro interior do tubo [m]

c_0 - velocidade de propagação do som [m/s]

ΔL - variação da pressão sonora [dB]

S_n - rácio da onda estacionária

$|r|$ - magnitude do fator de reflexão

K_0 - constante de atenuação do tubo

CWB - Conventional wall-based building (edifício de parede convencional)

CWBB - Conventional wall-based building Baltimore (edifício de parede convencional Baltimore)

CWBD - Conventional wall-based building Duluth (edifício de parede convencional Duluth)

CWBM - Conventional wall-based building Miami (edifício de parede convencional Miami)

GCW - Glass curtain wall building (edifício de parede de cortina de vidro)

GCWB - Glass curtain wall building Baltimore (edifício de parede de cortina de vidro Baltimore)

GCWD - Glass curtain wall building Duluth (edifício de parede de cortina de vidro Duluth)

GCWM - Glass curtain wall building Miami (edifício de parede de cortina de vidro Miami)

PCM - Phase Change Material (material de mudança de fase)

1

INTRODUÇÃO

1.1. ENQUADRAMENTO

Ao longo dos anos, com o avanço da tecnologia na construção de edifícios, os níveis de qualidade e de conforto térmico nas edificações têm-se tornado cada vez mais exigentes. A necessidade de melhoria desse conforto e em simultâneo a procura da sustentabilidade dos edifícios leva ao desenvolvimento de novos materiais e técnicas construtivas que prologuem a longevidade dos elementos da construção e, ao mesmo tempo, cumpram as suas funções durante a sua utilização.

O sector da edificação, onde o consumo energético é elevado, representa o problema central da crise energética ambiental como tal existe a necessidade de encontrar soluções que diminuam a procura de sistemas de aquecimento e arrefecimento com consumos de energia significativos. O consumo energético de sistemas de aquecimento apresenta um acréscimo de 0,6 % ao ano, enquanto os sistemas de arrefecimento registam um aumento que alcança os 14,6 % ao ano (Pires, Silva e Castro-Gomes, 2005).

Como tal, o aparecimento dos materiais de mudança de fase (PCM) no mercado surge como uma alternativa sustentável para ajudar na resolução do problema apresentado. Estes materiais, estudados e testados desde há quatro décadas são vocacionados para utilização nos elementos construtivos caracterizam-se pela elevada capacidade de armazenamento de calor lento, associado à mudança entre o estado sólido e o estado líquido, com temperaturas de fusão próximas das temperaturas de conforto requeridas no interior das edificações (20° C a 25° C). A incorporação deste material na construção, apesar de ser recente, perspectiva-se com um desenvolvimento interessante pois as suas propriedades permitem a redução de amplitudes térmicas diárias tornando as temperaturas do ambiente interior mais homogêneas, mais estáveis e mais próximas dos níveis pretendidos. O funcionamento de forma passiva aproveitando a energia solar, através do incremento da capacidade de armazenamento de calor fornecida pelos PCM, permite que os consumos de energia para obtenção dos níveis de conforto desejados sejam diminuídos.

Em Portugal, tendo em conta a sua atual situação económica, é importante que nas novas construções se tenham presentes medidas de conservação de energia com uma visão da utilização racional das fontes energéticas, sendo de grande importância o aproveitamento da energia solar passiva.

Apesar da grande atratividade dos PCM, vários estudos decorrem sobre a sua aplicação prática na construção. O custo inicial do material e o seu tratamento requerem, ainda, custos elevados aliados a um mercado pouco desenvolvido com uma procura baixa.

Neste trabalho apresentam-se, numa primeira parte, casos práticos de estudos realizados em edifícios com PCM mostrando o seu contributo para a economia de energia e melhoria de conforto térmico interior. Numa segunda, estudaram-se as propriedades do PCM em relação á absorção sonora, tema ainda muito pouco explorado por investigadores

1.2. OBJETIVOS

O presente trabalho tem como principal objetivo explicar como a introdução de PCM em edifícios pode influenciar o conforto térmico interior de uma forma económica.

As exigências a nível da sustentabilidade e da energia têm obrigado à procura novas soluções económicas e eficientes, como tal, esta dissertação apresenta, de uma forma sintetizada, exemplos de estudos realizados com PCM aplicados em edifícios como alternativa de resposta ao problema apresentado. Com a pesquisa de informação em artigos e investigações mostrou-se como os PCM contribuem de uma forma passiva para o aquecimento e arrefecimento de edifícios recorrendo a fonte de energia solar e por conseguinte diminuição dos gastos de energia.

Assim, dentro desta temática pretende-se responder a alguns objetivos secundários como:

- Compreender o mecanismo de funcionamento dos PCM no auxílio do arrefecimento e do aquecimento passivo de edifícios;
- Perceber como se poderá poupar energia num edifício com a incorporação destes materiais através da redução de picos de temperatura.

Posto isto, numa segunda parte deste trabalho foi ainda estudada uma área dos materiais de mudança de fase pouco ou nada investigada, o seu comportamento acústico. Dentro deste subtema o principal objetivo é caracterizar as propriedades de absorção sonora do PCM nas diferentes gamas de frequências. Uma amostra de PCM foi ensaiada em laboratório com recurso a um tubo de ondas estacionárias e obtiveram-se os valores dos coeficientes de absorção sonora. Posteriormente, para responder a objetivos secundários como a avaliação das suas propriedades de absorção sonora, comparou-se os resultados obtidos nos ensaios com outros materiais correntemente utilizados na construção de edifícios e tiram-se as respetivas conclusões.

Em última análise, este trabalho espera contribuir para o reforço da ideia de que o futuro da construção terá que passar por um uso racional da energia com vista ao aproveitamento da energia solar como prioridade na projeção e construção de edifícios. Pretende-se também um incentivo à investigação das características acústica do material de mudança de fase, visto que, a área possui escassa informação.

1.3. APRESENTAÇÃO DO CONTEÚDO DA TESE

A presente dissertação encontra-se dividida em cinco capítulos de forma a cumprir os dois grandes objetivos estipulados, a influência que os PCM têm no conforto interior dos edifícios e suas poupanças energéticas associadas e a caracterização da capacidade de absorção sonora do PCM com recurso a ensaios laboratoriais. O conteúdo da tese foi organizado nos seguintes capítulos:

- Capítulo 1 – resume os objetivos deste trabalho e faz uma breve introdução dos restantes capítulos;
- Capítulo 2 – apresenta uma síntese do estado de arte relativo ao domínio dos materiais de mudança de fase com aplicação na construção. Primeiramente aborda conceitos base associados ao processo de armazenamento de calor. Em segundo lugar centra-se na classificação em categorias referindo as principais propriedades a eles associados. De seguida refe-se os principais métodos de incorporação deste material noutros materiais utilizados na construção. Por último, apresenta de uma forma sintética, alguns exemplos de trabalhos de outros autores, de soluções construtivas onde os PCM foram aplicados com sucesso.

- Capítulo 3 – apresenta exemplos de estudos realizados onde o PCM é aplicado em edifícios com o intuito de reduzir os gastos energéticos para o aquecimento e arrefecimento de edifícios. São ilustradas soluções bem como o modo de funcionamento do processo.
- Capítulo 4- descreve o estudo experimental realizado. Primeiramente faz uma breve introdução a alguns conceitos de acústica, seguindo de toda metodologia equipamentos presentes no ensaio do tubo de ondas estacionárias. Por fim analisa os resultados obtidos no ensaio bem como a comparação dos mesmos com outros materiais de construção e respectivas conclusões à cerca das suas propriedades acústicas.
- Capítulo 5 - resume as principais conclusões deste trabalho e expõe possíveis perspectivas de desenvolvimento futuro para dar continuidade ao estudo apresentado nesta dissertação.

2

ESTADO DA ARTE – MATERIAL DE MUDANÇA DE FASE

2.1. PCM - INTRODUÇÃO

Os “Phase Change Materials” (PCM) são utilizados para armazenar energia sob a forma de calor latente. A elevada capacidade de armazenamento, a uma temperatura e volume aproximadamente constantes, distingue de todos os outros materiais tradicionalmente utilizados na construção de edifícios fig. 1.

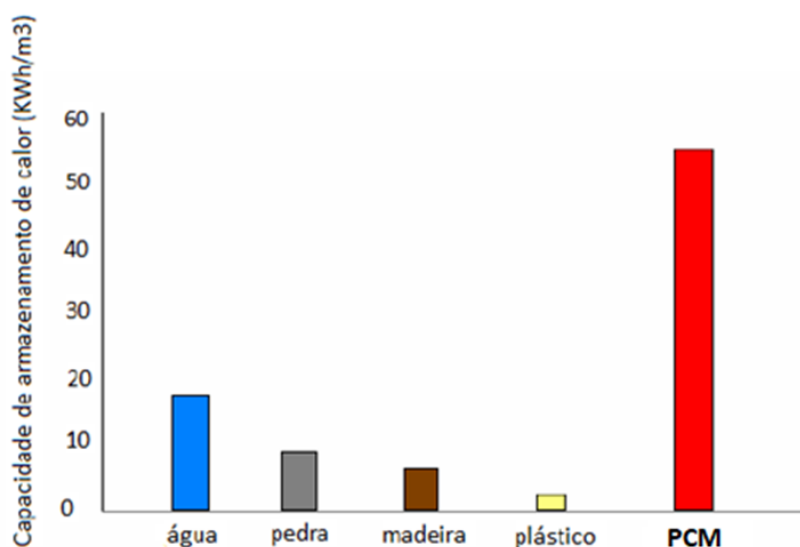


Figura 1 – Gráfico com a comparação da capacidade de armazenamento de calor de alguns materiais correntes na construção

Estes materiais caracterizam-se por mudarem de estado físico a temperaturas compreendidas entre os 20° e os 32° Celsius permitindo que os fenómenos de absorção e libertação de energia, decorrentes das mudanças de estado físico (fig2.), garantam com maior eficiência os níveis de conforto térmico no interior dos edifícios.

Desta forma, quando a temperatura ambiente sobe até ao correspondente ponto de fusão, as ligações químicas do PCM quebram e este passa do estado sólido ao líquido verificando-se uma reação endotérmica, ou seja, o PCM incorporado no material construtivo absorve o calor fornecido, fundindo,

limitando assim o fluxo de calor para o interior do edifício. Quando a temperatura desce abaixo do ponto de fusão, o PCM regressa novamente ao estado sólido, verificando-se a libertação do calor armazenado (reação exotérmica), atrasando assim a tendência para o arrefecimento do edifício.

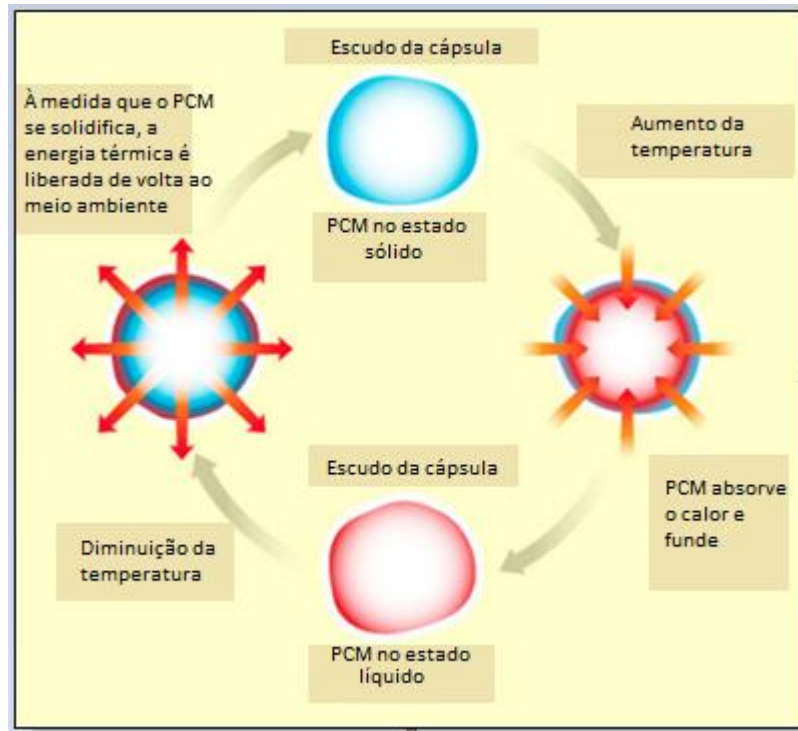


Figura 2 – Fenómenos de absorção e libertação de energia decorrentes das mudanças de estado físico do PCM (UCDAVIS 2019)

Estes ciclos de absorção e libertação contribuem para a estabilização da temperatura interior tornando, atualmente, os PCM como um dos métodos, de aquecimento e arrefecimento passivos, mais eficazes para o controlo da variação diária da temperatura ambiente de um edifício reduzindo as necessidades de climatização interiores. O seu funcionamento em auxílio de equipamentos de ar condicionado ou outros sistemas de regulação de temperatura interior torna os edifícios mais eficientes ao nível energético, gerando um impacto positivo nos consumos e custos energéticos e no meio ambiente (Shilei, Neng e Guohui, 2006).

Estudos sobre o uso de PCM em edifícios têm-se centrado em duas aplicações primárias: sistemas passivos com a incorporação de PCM em paredes e tetos e ainda em sistemas ativos com a aplicação de PCM em pavimento radiante elétrico. O que diferencia um sistema passivo e um ativo é a forma como o calor é libertado para o espaço interior: no primeiro caso, o PCM incorporado em paredes, tetos ou portadas liberta o calor acumulado consoante as variações térmicas do edifício, por outro lado, num sistema ativo a energia é libertada em momentos estratégicos, de modo a transferir o uso de energia para períodos de menor custo energético (Auckaili e Farid, 2004).

O uso do PCM estende-se por diversas áreas, tais como: na indústria alimentar, presente na conservação dos alimentos; na indústria automóvel, usado no arrefecimento de motores; na indústria têxtil, através de incorporação de microcápsulas em vestuário; na indústria da construção, em materiais e componentes

da construção com a finalidade de controlar as amplitudes térmicas de espaços interiores; entre outras áreas (Mondal, 2008).

Neste capítulo, são referidos alguns conceitos e definições associados aos materiais de mudança de fase bem como os seus diferentes tipos e algumas das suas principais propriedades. Por fim apresentam-se algumas das formas de os aplicar no interior de edifícios.

2.2. DEFINIÇÕES E CONCEITOS

Os materiais correntemente utilizados na construção têm propriedades que lhes conferem maior ou menor capacidade de armazenar calor. Nos materiais de mudança de fase se destacam-se pela sua elevada capacidade de armazenar calor. A mudança de fase e a temperatura a que essa transição acontece atribui, aos PCM, uma característica única que os torna eficientes para garantir bons desempenhos térmicos em edifícios.

Antes de mais, é necessário abordar alguns conceitos como: condutibilidade térmica, calor específico e calor específico volumétrico, difusibilidade térmica, fase e entalpia para melhor compreensão desta temática.

A condutibilidade térmica, representada pelo símbolo λ em $W/(m.K)$, é a quantidade calor que atravessa, por unidade de tempo, uma superfície de área unitária, para uma diferença unitária de temperatura entre essa superfície e outra situada a uma distância unitária.

Por definição, o calor específico é a quantidade de calor necessária para elevar de uma unidade de temperatura uma unidade de massa de um corpo (a pressão constante), representa-se por: c_p e exprime-se nas unidades de $J/(kg \cdot K)$. Uma outra propriedade relacionada é o calor específico volumétrico – C resultante do produto da massa volúmica pelo calor específico do material, $\rho \cdot C_p$, em $J/(m^3 \cdot K)$ avalia a capacidade de um material armazenar energia.

Difusibilidade térmica – αT , é a designação dada à relação entre a condutibilidade térmica e o calor específico volumétrico ($\alpha = \lambda / (\rho \cdot c_p)$), expressa-se em (m^2/s) . Representa uma medida da capacidade de um material conduzir energia térmica em relação à capacidade de o armazenar, ou seja, expressa a velocidade a que um corpo se ajusta por inteiro à temperatura que o envolve. Materiais com elevados αT respondem rapidamente a alterações térmicas no meio como é o caso dos metais, enquanto que materiais com αT reduzidos (como por exemplo o poliestireno extrudido (XPS), cortiça e outros materiais usados no isolamento térmico) responderão lentamente, demorando assim mais tempo até se estabelecer um novo ponto de equilíbrio.

Na tabela 1 é possível fazer uma comparação entre materiais de construção correntemente utilizados e os materiais de mudança de fase comercializados ao nível dos parâmetros da condutibilidade térmica, massa volúmica, calor específico e calor específico volumétrico.

Tabela 1 - Tabela com a comparação de parâmetros térmicos entre os PCM e materiais correntes na construção (Sá, A.M.V., 2013)

| Material | Condutibilidade térmica | Massa Volúmica | Calor Específico | Calor Específico Volumétrico |
|---------------------------------------|-------------------------|-----------------------------|-------------------|---|
| | λ [W/(m·K)] | ρ [Kg/m ³] | C_p [KJ/(Kg·K)] | $\rho \cdot C_p$ [KJ/(m ³ ·K)] |
| Água (T=10°C) | 0,600 | 1000 | 4,181 | 4181 |
| Ar (T=20°C) | 0,025 | 1,230 | 1,012 | 1,245 |
| Betão normal | 1,650 | 2000 - 2300 | 0,880 | 1760 - 2024 |
| Cerâmica (tijolos, telhas, ladrilhos) | 0,6 | 1400-1600 | 0,840 | 1176-1344 |
| Isolantes térmicos: | | | | |
| EPS | 0,040 | 15,00–20,00 | 1,550 | 15,83–21,10 |
| XPS | 0,037 | 25,00–40,00 | 1,045 | 26,1 –41,80 |
| ICB | 0,045 | 90,00-140,00 | 0,170 | 15,30–23,80 |
| Madeira (madeiras densas) | 0,230 | 750,0–820,0 | 1,500–2,500 | 1125–2050 |
| PCM: Bio PCM M27/Q23 (PCM orgânico) | 0,200 | 235,0 | 1,97 | 462,95 |
| RT31 (parafina) | 0,200 | 880 (sólido a 15°C) | 2 | 1760 |

A mudança de temperatura, a existência da água ou a alteração do estado físico são fatores que alteram as propriedades dos materiais. Assim, o aumento da temperatura, por norma, faz diminuir o valor da condutibilidade térmica (λ) e aumentar o calor específico (c_p), por sua vez, a existência de humidade, em geral, contribui para o aumento dos valores de λ e c_p uma vez que a água, como se observou na tabela anterior, é das substâncias que apresenta maior calor específico. Ainda de salientar, que os materiais quando se encontram no estado sólido apresentam valores de condutibilidade térmica superiores do que quando se apresentam no estado líquido ou gasoso devido ao rearranjo das suas moléculas.

A compreensão destes conceitos torna-se essencial para se perceber como os PCM, que apresentam uma mudança de fase em intervalos de temperatura compatíveis com a utilização dos edifícios, conseguem desempenhar um bom desempenho térmico.

Define-se como, estado, a quantidade de matéria totalmente homogénea (sólido, líquido e gasoso). Em cada estado as partículas podem existir a várias temperaturas e pressões sendo que, no estado sólido, as moléculas encontram-se fortemente ligadas conferindo mais estabilidade à forma da matéria, por outro

lado, o estado gasoso é caracterizado pela fraca coesão molecular não tendo o material qualquer forma. O estado líquido é o estado intermédio como se pode observar na figura 3.



Figura 3 – Coesão molecular da água nos diferentes estados físicos (ebah 2019)

A água é um bom exemplo para a explicação dos conteúdos acima mencionados. Supondo que temos uma massa de gelo, a temperatura e pressão conhecidas, ao ser fornecido calor, a uma pressão constante o seu volume aumenta, superficialmente, até à temperatura de 0°C ponto onde ocorre a fusão do gelo e a conservação da temperatura a 0°C . A partir deste ponto todo o calor fornecido é aproveitado para se realizar a passagem do estado sólido ao líquido. São necessários, aproximadamente, o fornecimento de 334 kJ/kg de calor (ou energia) para que ocorra a referida fusão do gelo em água (reação endotérmica). Após todo o gelo estar fundido qualquer transferência de calor adicional provoca um aumento de temperatura do líquido até se atingir os 100°C de temperatura, altura em que ocorre o fenómeno de ebulição (passagem da água do estado líquido ao estado gasoso). São necessários fornecer 2260 kJ/kg de energia para ocorrência deste processo verificando-se novamente uma reação endotérmica. Por sua vez, a energia fornecida à água a 0°C (na temperatura de fusão) só será devolvida após a redução da temperatura na mudança de estado da água para gelo (reação exotérmica).

O gráfico da fig.4 mostra, de uma forma mais sintética, as quantidades de energia sob forma de calor utilizada pela água para as respetivas mudanças de estado.

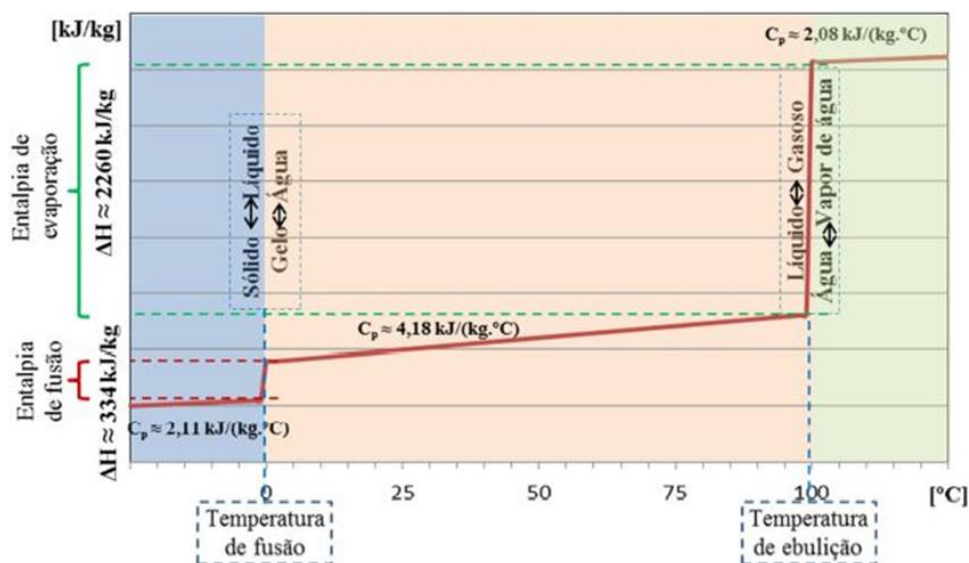


Figura 4 – Gráfico com as quantidades de energia sob forma de calor utilizada pela água nas mudanças de estado (Sá, A.M.V., 2013).

Pela observação do gráfico da figura 4, percebe-se a existência de uma grande diferença de patamares de energia associados às mudanças de fase. À quantidade total de energia resultante da mudança de fase denomina-se de “entalpia de mudança de fase” ou simplesmente “entalpia”, representada pela letra H (J/kg).

No gráfico, é de realçar a existência de três retas com baixo declive e duas com elevado declive que nos explicam a diferença entre o calor sensível e o calor latente. O calor sensível tem influência no aumento de temperatura do corpo (retas com baixo declive), ou seja, quando a água é aquecida a respetiva temperatura sobe à medida que o calor é adicionado. Por sua vez, o calor latente (associado às retas de elevado declive) quantifica a energia necessária para um material mudar de fase.

Os PCM, empregues em edifícios, são caracterizados pelas passagens entre a fase sólida e líquida que estão associados a uma reação química endotérmica na fusão (quando da passagem de sólido a líquido), e a uma reação exotérmica na solidificação (passagem de líquido a sólido). Estas propriedades e outras características dos PCM a utilizar no interior de edifícios estão especificadas no subcapítulo seguinte.

2.3. PCM: PROPRIEDADES, CLASSES, CATEGORIAS

Os materiais de mudança de fase agrupam-se em dois grupos distintos uns associados ao calor latente (calor gerado durante as mudanças de estado) e outros associados ao calor sensível (resultante da diferença e do desfaseamento entre as temperaturas interiores e exteriores e a estabilização da temperatura no interior dos edifícios).

Os materiais de construção tradicionais enquadram-se no grupo de materiais ligados ao calor sensível enquanto que os PCM se inserem no conjunto associado ao calor latente. Os PCM usados na construção são aqueles que fazem a transição do estado sólido para o líquido sendo ainda classificados de acordo com a sua composição química em duas categorias distintas: os orgânicos e os inorgânicos, como se pode observar na figura 5.

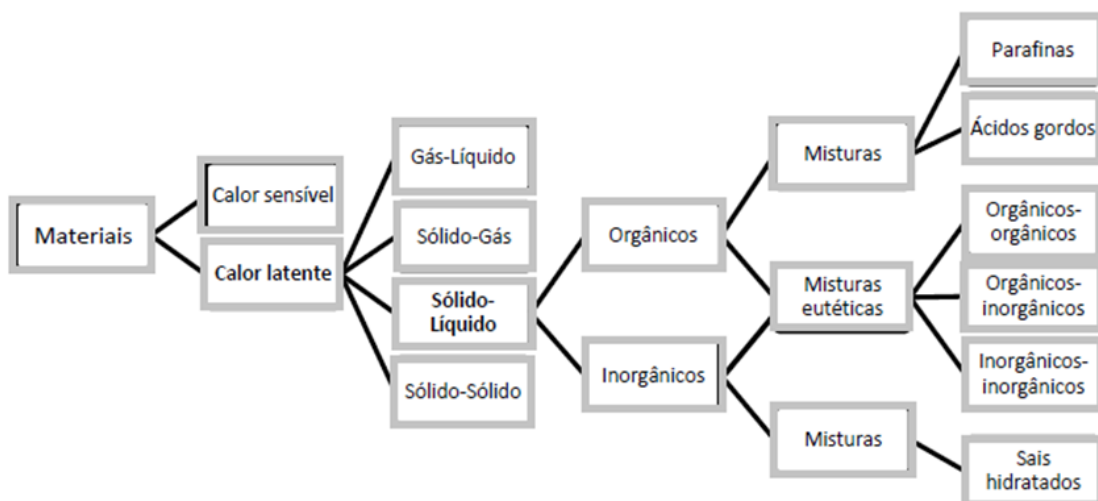


Figura 5 – Diferentes categorias dos PCM (adaptado Sá, A.M.V., 2013)

Abhat (1983) subdividiu-os em duas categorias, misturas eutéticas e misturas onde nesta categoria encontramos as parafinas, sais hidratados ou ácidos gordos.

A figura 6 mostra a distribuição dos PCM de acordo com o intervalo de temperatura a que ocorre a transformação de sólido em líquido (temperatura de fusão) de acordo com uma gama de entalpias características.

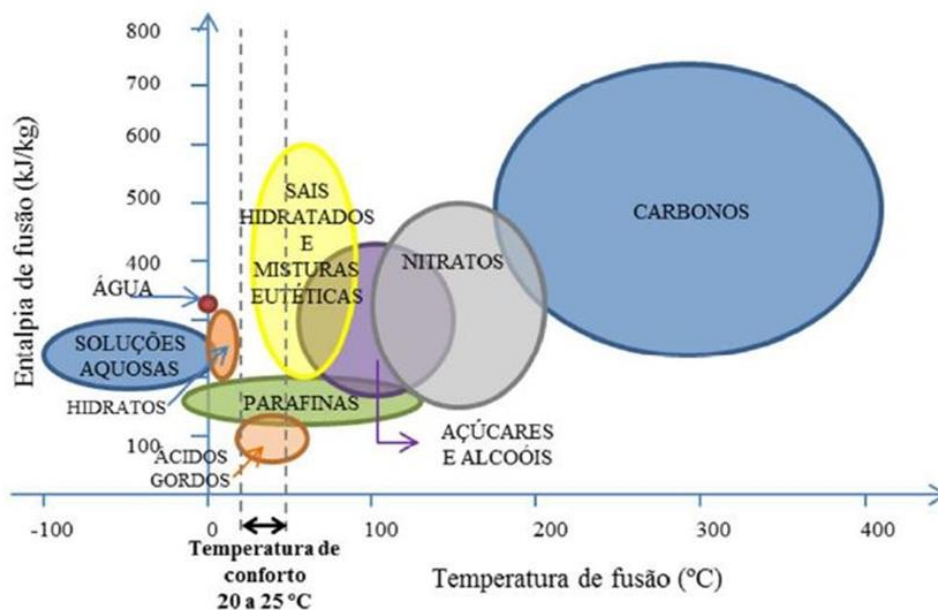


Figura 6 – Distribuição dos PCM com a temperatura de fusão de acordo com a entalpia de fusão (Sá, A.M.V., 2013).

Pela análise da figura anterior conclui-se que existem três grupos de materiais PCM (parafinas, ácidos gordos e sais hidratados e misturas eutéticas) cujo os intervalos da temperatura de fusão são compatíveis com a gama de temperaturas de conforto (20° C a 25° C), sendo assim, adequados para serem aplicados no interior de espaços habitados. Dentro destes três grupos mencionados, percebe-se que são os sais hidratados e misturas eutéticas quem apresenta uma maior entalpia de fusão conseguindo armazenar uma maior quantidade de calor. À partida, parece o grupo mais vantajoso, contudo são as parafinas que detêm as características mais adequadas ao uso na construção. Estudos realizados recentemente por Shukla, Buddhi e Sawhney (2008) garantem que os PCM orgânicos (grupo onde se encontram as parafinas) possuem maior estabilidade química que os PCM inorgânicos.

Na tabela 2 estão apresentadas as principais características necessárias à definição dos materiais de mudança de fase das misturas orgânicas, inorgânicas e eutéticas onde se compreende melhor as suas diferenças e percebe-se quais as suas vantagens e desvantagens.

Tabela 2 – Principais características associadas aos PCM e suas vantagens e desvantagens

| | Misturas Orgânicas | Misturas Inorgânicas | Misturas Eutéticas |
|---------------------|--|--|--|
| Vantagens | Estabilidade química, recicláveis | Reduzida variação de volume | Entalpia de fusão elevada |
| | Elevada entalpia de Fusão | Baixo custo | Temperatura de fusão bem definida (exata) |
| | Boa compatibilidade com outros materiais | Entalpia de fusão elevada | Elevada capacidade de armazenamento de calor |
| | Existentes numa vasta gama de temperaturas de fusão Baixo ou nenhum sobreaquecimento | Melhor condutibilidade térmica ($\lambda \approx 0,5 \text{ W/(m.K)}$) | |
| Desvantagens | Alteração de volume Inflamável Baixa condutibilidade térmica ($\lambda \approx 0,2 \text{ W/(m.K)}$) | Corrosão Sobreaquecimento | Falta de informação disponível |

Na tabela 3, pode-se observar algumas das mais importantes propriedades aquando da escolha dos PCM a aplicar num edifício. Assim, conclui-se que as propriedades térmicas são as mais decisivas na seleção dos PCM, propriedades como: apresentação de um intervalo de temperaturas de mudança de fase adequado à temperatura de utilização do edifício; temperatura de fusão adequada ao conforto requerido para o espaço interior e às condições climáticas da envolvente do edifício; capacidade de armazenamento de calor latente e sensível elevada; a condutibilidade térmica deve contribuir para facilitar a restituição do calor armazenado ao meio interior, portanto, deve ser elevada.

Tabela 3 – Propriedades decisivas na escolha de um PCM

| Propriedades Térmicas | Propriedades Química | Propriedades Físicas | Propriedades Económicas |
|---|---|--|-------------------------|
| Elevada Entalpia | Não inflamáveis, não poluentes e não tóxicos | Reduzida variação da massa volúmica | Barato e abundante |
| Calor específico e massa volúmica elevadas | Duráveis (não apresentam degradação ao fim de vários ciclos de fusão/solidificação) | Reduzida alteração de volume na mudança de fase | |
| Elevada condutibilidade térmica (nas fases sólida e líquida) | Estabilidade química | Reduzida pressão de vapor durante a mudança de fase | |
| Temperatura de fusão/solidificação próxima da temperatura de conforto | Reversibilidade na passagem de sólido/líquido e de líquido/sólido | Mudança de fase uniforme na passagem de sólido/líquido e de líquido/sólido | |

2.4. MATERIAIS DE MUDANÇA DE FASE COM APLICAÇÃO NO INTERIOR DOS EDIFÍCIOS

Os materiais de mudança de fase com a sua capacidade de armazenar calor a temperatura constante (temperatura de fusão) permitem, de uma forma muito eficiente, preservar a temperatura interior dos edifícios. Desta forma, procuram-se os PCM com temperaturas de fusão adequadas às exigências de conforto normalizadas. Segundo a normalização em vigor, as temperaturas de conforto exigidas variam entre a estação de aquecimento e de arrefecimento no intervalo dos 20°C a 25°C, pelo que, devem ser aplicados os PCM com a temperatura de fusão no intervalo entre 18°C e os 30°C, de modo a que os níveis exigidos sejam correspondidos.

Nas tabelas 4 e 5, estão indicados alguns materiais de mudança de fase adequados à aplicação no interior de edifícios e ainda os que se já encontram disponíveis em mercado.

Tabela 4 – Materiais de mudança de fase adequados à aplicação na construção (Sá, A.M.V., 2013)

| Designação comercial | Tipo | Temperatura de Fusão T [°C] | Entalpia de Fusão ΔH [KJ/(Kg·K)] | Calor Específico C_p [KJ/(kg·K)] | Condutibilidade térmica λ [W/m·K] |
|----------------------|------|-----------------------------|--|------------------------------------|---|
| Parafina C16 -C18 | O | 20-22 | 152 | - | - |
| Parafina C13-C24 | O | 22-24 | 189 | 0,21 | 0,21 |
| Parafina C28 | O | 28 | 244 | 2,16 | 0,15 |

| Designação comercial | Tipo | Temperatura de Fusão T [°C] | Entalpia de Fusão ΔH [KJ/(Kg·K)] | Calor Espacifico C_p [KJ/(kg.K)] | Condutibilidade térmica λ [W/m·K] |
|--|--------|-----------------------------|--|------------------------------------|---|
| Butyl stearate | O | 19 | 140 | - | - |
| 1-Dodecanol | O | 26 | 200 | - | - |
| n-Octadecane | O | 28 | 200 | - | - |
| Vinyl stearate | O | 27-29 | 122 | - | - |
| Dimethyl sebacate | O | 21 | 120-135 | - | - |
| Polyglycol E 600 | O | 22 | 127,2 | - | 0,189 |
| 45/55 Capric + lauric acid | EU-O | 21 | 143 | - | - |
| Propyl palmitate | O | 19 | 186 | - | - |
| Octadecyl 3-mercaptopropylate | O | 21 | 143 | - | - |
| KF.4H ₂ O | INO | 18,5 | 231 | 1,84 (s) 2,39 (l) | - |
| Mn(NO ₃).6H ₂ O | INO | 25,8 | 125,9 | - | - |
| CaCl ₂ .6H ₂ O | INO | 29,7 | 171 | 1,45 (s) | - |
| CaCl ₂ .6H ₂ O + Nucleat + MgCl ₂ .6H ₂ O(2:1) | EU-INO | 25 | 127 | - | - |
| 48% CaCl ₂ + 4.3% NaCl + 0.4% KCl + 47.3% H ₂ O | EU-INO | 26,8 | 188 | - | - |

Tabela 4 - Materiais de mudança de fase adequados à aplicação na construção (Sá, A.M.V., 2013)
(continuação)

Com a análise da tabela 4 encontra-se uma característica comum na lista dos PCM apresentados, a temperatura de fusão ocorre na gama de temperaturas de utilização dos edifícios, para além de também possuírem uma elevada entalpia o que permite um bom desempenho térmico quando aplicados aos edifícios.

Tabela 5 - Materiais de mudança de fase (PCM) adequados à aplicação na construção já existentes em mercado (Sá, A.M.V., 2013)

| Designação comercial | Temperatura de Fusão T [°C] | Entalpia de Fusão ΔH [KJ/(Kg·K)] | Calor Espacifico C_p [KJ/(kg.K)] | Condutibilidade térmica λ [W/m·K] | REFS. |
|----------------------|-----------------------------|--|------------------------------------|---|------------------|
| RT 20 (Parafina) | 22 | 172 | - | - | (Rubitherm 2009) |
| RT 25 (Parafina) | 25 | 147 | 2,1 (s) 2,9 (l) | - | (Rubitherm 2009) |
| RT 27 (Parafina) | 26-28 | 179 | 1,8 (s) 2,4 (l) | - | (Rubitherm 2009) |
| RT 30 (Parafina) | 30 | 206 | - | - | (Rubitherm 2009) |
| STL 27 | 27 | 213 | - | - | (Climator 2010) |

| Designação comercial | Temperatura de Fusão T [°C] | Entalpia de Fusão ΔH [KJ/(Kg·K)] | Calor Específico C_p [KJ/(kg.K)] | Condutibilidade térmica λ [W/m·K] | REFS. |
|--------------------------------|--------------------------------|---|---------------------------------------|--|-------------------|
| Climsel C23 (Sal hidratado) | 23 | 148 | - | - | (Cistopia 2010) |
| Climsel C24 (Sal hidratado) | 24 | 216 | - | - | (Cistopia 2010) |
| S 27 (Sal hidratado) | 27 | 190 | 1,47 (s) 2,22 (l) | 0,79 (s) 0,48 (l) | (PCM Energy 2009) |
| SP 22 A 17 | 22 | 150 | - | 0,6 | (Rubitherm 2009) |
| SP 25 A 8 | 25 | 180 | 2,5 | 0,6 | (Rubitherm 2009) |
| SP 29 | 29 | 157 | - | 0,6 | (Rubitherm 2009) |

Tabela 6 - Materiais de mudança de fase (PCM) adequados à aplicação na construção já existentes em mercado (Sá, A.M.V., 2013) (continuação)

2.5. INCORPORAÇÃO DE PCM EM MATERIAIS OU COMPONENTES DA CONSTRUÇÃO

2.5.1. INTRODUÇÃO

A incorporação de materiais de mudança de fase em materiais ou elementos construtivos pode ser realizado por três métodos distintos: impregnação, imersão e encapsulamento. A principal diferença que se encontra entre estas técnicas é o facto de a técnica de encapsulamento impedir o contacto direto entre o PCM e o material de construção envolvente enquanto que impregnação e a imersão condicionam os materiais pelo contacto direto com os PCM.

Neste pequeno subcapítulo irá ser abordado cada uma dessas técnicas para melhor compreensão do seu funcionamento.

2.5.2. IMPREGNAÇÃO

A impregnação (ou incorporação direta) consiste na adição de PCM aos constituintes de misturas de determinados materiais de construção, como por exemplo, misturas de gesso, cimento e argamassa na forma sólida (pó) ou líquida (solução aquosa) durante a sua produção. Este é um método de fácil execução e não recorre a equipamentos completos para introdução de PCM nos materiais de construção. Apresenta apenas a desvantagem da sua incompatibilidade com os materiais de construção.

2.5.3. IMERSÃO

O método de imersão direta de PCM é geralmente utilizado com materiais de construção porosos como por exemplo: elementos de betão, gesso ou cerâmica. Neste processo, os materiais são imersos em PCM derretido ou dissolvido que, por capilaridade, se entranha nos seus poros ficando o PCM endurecido após a sua secagem. O facto de poder converter um material corrente num composto PCM torna-o bastante vantajoso, contudo apresenta alguns inconvenientes pois trata-se de um processo demorado e que implica o desperdício de PCM durante a imersão e na utilização do material composto, devido a fugas de PCM ao longo dos vários ciclos de fusão e solidificação (Kaasinen, 1992).

2.5.4. ENCAPSULAMENTO

Os materiais de mudança de fase podem ser encapsulados quando se pretende que estes não estejam em contacto direto com os materiais de construção, evitando assim, possíveis incompatibilidades entre eles, além de facilitar o manuseamento do PCM quando se encontra no estado líquido. Neste processo, os PCM são introduzidos em macro ou microcápsulas podendo ser revestidos por vários materiais, geralmente polímeros de diversas formas e tamanhos.

2.5.4.1. Microencapsulação

Define-se como microencapsulação o processo de revestir uma substância numa outra substância numa escala muito pequena resultando pequenas cápsulas com diâmetro compreendido entre 1 a 1000 μm , que podem possuir paredes contínuas, esféricas, ou assimétricas com várias formas. A película polimérica deverá ser compatível com o PCM e com os materiais de construção (Sá, 2013). Este processo é vantajoso pois é de fácil aplicação, não exige alteração dos processos construtivos e as microcápsulas não se danificam com a utilização corrente do edifício.

Por outro lado, alguns estudos sobre os PCM microencapsulados indicam que as propriedades dos materiais podem ser alteradas. Num estudo publicado por Hunger et al. (2009) afirmou-se que as propriedades térmicas e mecânicas do betão endurecido auto contactável são afetadas com o aumento da percentagem de PCM microencapsulado. Comprovou-se também uma diminuição da resistência à compressão e da condutibilidade térmica do betão endurecido com o aumento da dose de PCM.

Apesar destes contras, Cabeza et al. (2007) descreve a incorporação dos PCM em microcápsulas como um processo seguro considerando o PCM incorporado como mais um agregado do betão não afetando significativamente o desempenho das paredes de betão endurecidas.

2.5.4.2. Macroencapsulação

A macroencapsulação consiste no encapsulamento do material num compartimento com diâmetro, por norma, superior a 1 cm. As macrocápsulas podem apresentar diversas formas tais como: cilíndricas, esféricas, em forma de tubo, entre outras, podendo ser fabricadas a partir de vários materiais como folha de alumínio ou polímeros. São produzidas isoladamente e posteriormente inseridas nos edifícios na forma de permutadores de calor ou incorporados nos elementos construtivos (Cabeza et al., 2007).

Tal como no microencapsulação, a macroencapsulação impede fuga dos PCM em estado líquido e a alteração das suas características por meio de reações químicas com os materiais envolventes. Na figura 7 pode-se observar alguns exemplos de macrocápsulas contendo PCM.



Figura 7 – Macro­cápsulas com PCM incorporado (BASF 2019)

Por outro lado, é necessário adequar os sistemas construtivos à presença de macrocápsulas para além dos cuidados a ter com a proteção física das cápsulas ao longo da utilização do edifício. Outra desvantagem relativamente à microencapsulação é a elevada concentração de PCM presente na macrocápsula que reduz a condutibilidade térmica e promove a cristalização do material junto aos limites da cápsula dificultando as transferências de calor acumulado para o exterior (Cabeza et al., 2007).

Estes dois métodos de encapsulamento acarretam elevados custos estando ainda, muitos estudos a serem desenvolvidos relativamente às incompatibilidades existentes com alguns materiais de construção.

2.6. MATERIAIS E COMPONENTES DA CONSTRUÇÃO COM PCM

Com o desenvolvimento de novas técnicas construtivas e a produção de novos materiais, o impacto dos PCM tem sido cada vez maior numa atualidade em que se privilegia uma construção sustentável e ecológica. A grande versatilidade que encontramos nos PCM em se adaptarem aos vários materiais e componentes construtivos presentes num edifício permite a sua utilização em sistemas passivos, através da possibilidade de se puderem incorporar em placas de gesso cartonado, paredes de betão, tetos ou pavimentos para aumentar a capacidade de armazenamento de calor destes elementos.

Neste subcapítulo enumeram-se algumas soluções construtivas onde foram aplicadas com sucesso a incorporação de PCM, sendo elas:

- Gesso cartonado;
- Elementos à base de betão;
- Paredes de Trombe;
- Blocos de betão ou tijolo;
- Tetos falsos;
- Pavimentos radiantes;

2.6.1. GESSO CARTONADO

As placas de gesso cartonado são um produto cada vez mais utilizado na construção de divisórias interiores e no revestimento e isolamento de tetos e paredes, tornando-as ideais à incorporação de PCM. Sendo considerado um material económico e eficiente em relação às habituais massas térmicas utilizados em edifícios, para o armazenamento de calor, tornou-se numa das mais divulgadas soluções construtivas com PCM.

Foram produzidas placas com 20% a 30% de PCM incorporados por imersão direta (Scalat et al., 1996) ou por microencapsulamento (Borreguero et al., 2011), com características térmicas distintas em função da aplicação desejada.

Atualmente, já se encontram no mercado placas de gesso cartonado com uma entalpia de fusão de 22 KJ/Kg, com uma temperatura de fusão de 23° C fig.8.

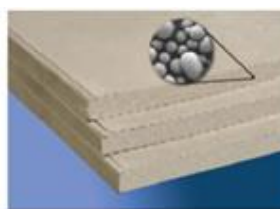


Figura 8 – Placas de gesso cartonado com PCM incorporado (BASF 2019)

Estudos realizados comprovam a eficiência deste material como foi o caso apresentado por Scalat et al. (1996), onde foi analisada a estabilização das temperaturas interiores de um compartimento com sistemas de climatização intermitentes, resultando num bom desempenho da capacidade de armazenamento de calor das placas de gesso cartonado com PCM, conferindo ao compartimento temperaturas na gama de conforto durante períodos de tempo mais longos, após o funcionamento dos sistemas de climatização.

Schmidt et al. (2007) comprovou que uma placa de gesso cartonado com PCM de espessura 1,5 cm tinha um desempenho equivalente a uma parede de cimento de 14 cm ou a uma parede de tijolo de 36,5 cm em termos de armazenamento de calor latente.

2.6.2.ELEMENTOS À BASE DE BETÃO

O PCM pode ser incorporado com grande facilidade em paredes e pavimento à base de betão, visto que, o betão é um material poroso e com grande capacidade de absorção. A sua incorporação pode ser obtida pela mistura de PCM (encapsulado ou não) nas restantes matérias primas constituintes do betão, pela imersão dos elementos de betão endurecido em PCM derretido ou em soluções aquosas contendo PCM (Bentz e Turpin, 2007).

Todavia, a fusão destes dois elementos apresenta algumas limitações, como foi provado em estudos realizados (Cabeza et al., 2007) onde o material incorporado afetou a capacidade de resistência à compressão do betão, comprometendo assim, a estabilidade a longo prazo e a resistência ao fogo.

Muitos estudos estão a ser realizados neste âmbito não sendo de maior importância a incorporação de PCM neste elemento dado que pavimentos e paredes de betão sem qualquer outro tipo de revestimento não são muito usuais.

2.6.3.PAREDES DE TROMBE

Nos dias de hoje, cada vez é maior a procura de construções sustentáveis com o intuito da diminuição dos gastos energéticos. Surgem então as paredes de trombe, uma técnica de construção passiva, onde se constrói uma parede na face do edifício mais exposta à radiação solar na estação fria. A parede é constituída por uma camada exterior de vidro, uma camada intermedia de ar e uma estrutura interior com elevada capacidade de armazenamento fig.9.

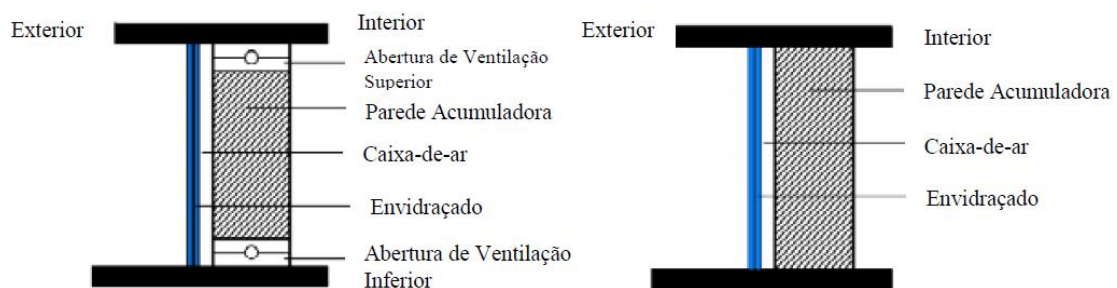


Figura 9 – Esquema construtivo de uma parede de trombe (Gonçalves, R.R., 2015)

Dado que se pretende aumentar a capacidade de armazenamento de calor, PCM como sais hidratados, ácidos gordos ou parafinas são introduzidos nas referidas paredes uma vez que são mais leves e requerem menor espaço que os tradicionais elementos de alvenaria que compõe a parede de trombe. Bourdeau

(1980) concluiu que uma parede com PCM de apenas 8 cm de espessura tem um desempenho térmico superior a uma parede de alvenaria com 40 cm. Chandra et al. (1985) confirmaram que uma parede com PCM de menor espessura é mais eficiente do ponto de vista térmico do que uma parede de Trombe corrente, apresentando maior capacidade de armazenamento de calor.

2.6.4. BLOCOS DE BETÃO OU TIJOLO

A incorporação de PCM em blocos de betão ou cerâmicos pode ser realizada por imersão direta de materiais de mudança de fase (microencapsulado ou não), através da incorporação de macrocápsulas com PCM e ainda por imersão dos blocos em PCM líquido aquecido.

Estudos realizados por Athienitis et al. (1997) pelo método da introdução direta do PCM em blocos de betão, permitiu concluir que a capacidade de absorção de calor aumentava significativamente, contudo, Hawes chamou a atenção para o facto da resistência dos blocos de betão reduzir consideravelmente, impedindo desta forma a incorporação de PCM em grandes quantidades.

Outra forma encontrada para a incorporação do PCM foi em tijolos cerâmicos. Alawadhi (2008) analisou blocos cerâmicos com furos cilíndricos onde colocou PCM macroencapsulado fig.10 centrado-se na absorção de calor pelos PCM para a redução das transferências de calor. Os resultados demonstraram que o fluxo de calor nos espaços interiores pode ser reduzido até cerca de 18%.

Zhang et al. (2008) veio suportar os estados já realizados com a sua análise a uma parede de alvenaria de tijolo incorporado com PCM nos poros, onde constatou que capacidade de armazenamento de energia térmica é superior a um tijolo comum resultando desta forma um melhor isolamento térmico.

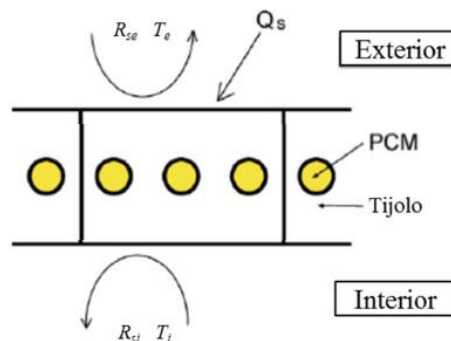


Figura 10 – Esquema de tijolo cerâmico com PCM macroencapsulado adaptado de (Alawadhi, E.M., 2008).

2.6.5. TETOS FALSOS

Os tetos falsos contendo materiais de mudança de fase são, normalmente, usados para a refrigeração de zonas interiores durante o período da estação quente, tirando partido do arrefecimento noturno. O princípio de funcionamento baseia-se no contacto existente entre o teto falso e o exterior por meio de grelhas reguláveis. Estas grelhas mantêm-se fechadas durante o dia fig.11 de forma a não entrar calor e a restringir a circulação do ar interior apenas á secção acima do teto onde o PCM absorve esse calor até atingir e manter a temperatura de fusão. Em contrapartida, durante a noite as grelhas são abertas fig.12 para que o PCM solidifique com as baixas temperaturas.

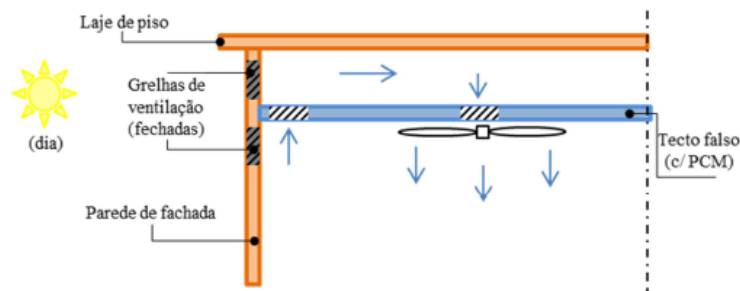


Figura 11 – Princípio de funcionamento de um teto falso com PCM durante o dia (Tyagi, V.V. and Buddhi, D., 2007).

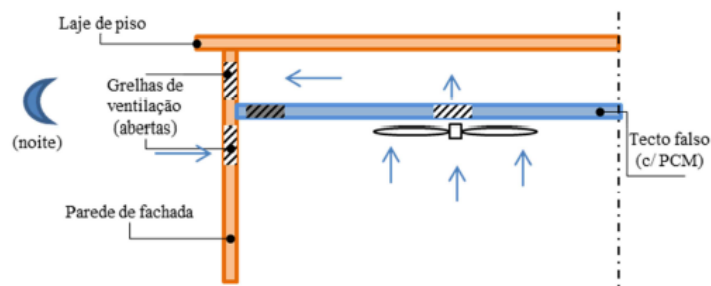


Figura 12 - Princípio de funcionamento de um teto falso com PCM durante a noite (Tyagi, V.V. and Buddhi, D., 2007).

2.6.6.PAVIMENTOS RADIANTES

Nos pavimentos radiantes também podem ser incorporados materiais de mudança de fase com o intuito de limitar o fluxo de calor emitido pelo piso radiante e assim diminuir o uso de energia para aquecimento. Para o seu uso eficiente, o aquecimento apenas deve estar ligado algumas horas por dia, sendo o calor acumulado pelo PCM libertado gradualmente. O pavimento radiante deve conter uma camada de isolamento térmico inferior fig.13, para evitar perdas de calor para o exterior.

Athienitis e Chen (2000) com os seus estudos e ensaios concluíram que a radiação solar direta poderá aumentar a temperatura superficial de um pavimento em 8 °C relativamente a um piso à sombra e que com um revestimento em carpete a diferença poderia chegar aos 15° C. Lin et al. (2005) aplicaram PCM sobre um pavimento radiante, tendo concluído que, é possível reduzir significativamente os consumos energéticos com uma adaptação construtiva simples.

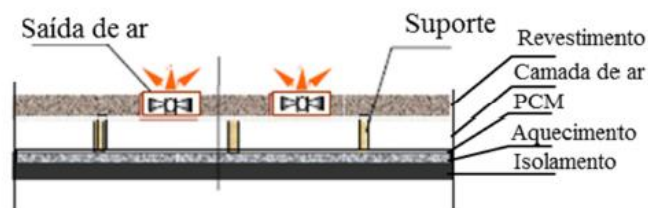


Figura 13 – Esquema construtivo de um pavimento radiante contendo PCM (Sá, A.M.V., 2013).

3

APLICAÇÕES DO PCM EM EDIFÍCIOS E SEU DESEMPENHO TÉRMICO

3.1. INTRODUÇÃO

Na indústria da construção, cada vez mais se desenvolvem sistemas de armazenamento de energia térmica usando PCM com o intuito de aumentar a capacidade de armazenamento de calor, diminuir o consumo de energia e melhorar o ambiente interno do edifício. Sendo um tema de interesse por parte de vários investigadores e entidades, têm sido realizados muitos trabalhos de pesquisas sobre a aplicação de PCM em edifícios.

Neste sentido abordou-se, neste capítulo, alguns casos onde o material de mudança de fase foi aplicado em edifícios analisando o seu comportamento, enquanto material térmico, expondo a sua resposta face ao clima exterior, para a melhoria no conforto térmico interior.

3.2. ARREFECIMENTO PASSIVO EM EDIFÍCIOS

Com o crescimento da população, o consumo de energia está a aumentar de dia para dia. Dados da União Europeia mostram que 40% do consumo de energia está relacionado com os edifícios, por norma, para o aquecimento e refrigeração de sistemas.

Neste sentido a procura de PCM como sistemas de armazenamento de energia, para o controlo da regulação da temperatura interior, permitiria reduzir o uso de ventilação mecânica e assim diminuir gastos energéticos.

O arrefecimento passivo em edifícios, durante as estações quentes, utiliza a diferença de temperatura do ar, entre o dia e a noite, para armazenar o ar frio da noite no PCM e o libertar durante o dia. Desta forma, através do processo de solidificação e fusão do PCM, integrado nos materiais do edificio, conseguimos o arrefecimento do espaço sem qualquer energia para produzir uma fonte fria. Este método de refrigeração livre leva à melhoria da qualidade do ar interior bem como a diminuição dos gases de efeito de estufa.

Muitos estudos têm sido realizados no domínio da refrigeração passiva dos edifícios com o uso de PCM.

Kuznik, Virgone e Roux (2008) construíram uma placa com PCM incorporado para aplicar numa superfície de uma parede normal, numa sala de teste, a fim de analisar o poder de refrigeração nas mesmas condições num dia de Verão. Comparando a sala com a placa de PCM à sala com a parede de constituição usual fig.14 verificou-se uma redução das oscilações de temperatura do ar de admissão e um aumento do conforto térmico.

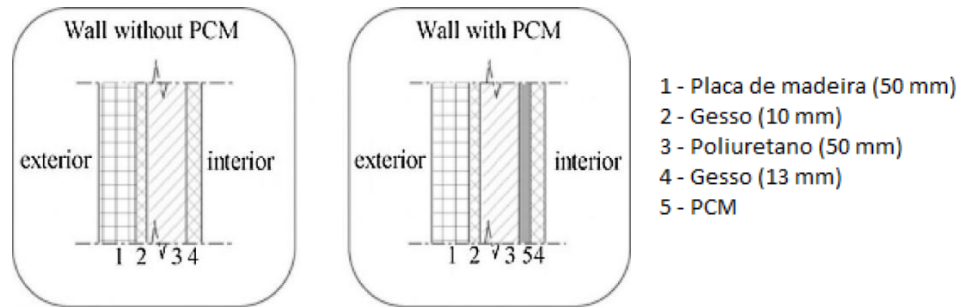


Figura 14 – Esquemas construtivos de paredes com e sem PCM de uma sala de testes (Kuznik, Virgone e Roux, 2008)

Evers, Medina e Fang (2010) estudou a combinação de parafina e sal hidratado, como PCM, em diferentes concentrações, isolado em celulose, nas cavidades de uma parede tendo reportado uma diminuição do pico de fluxo de calor de aproximadamente 9,2%.

Outro estudo realizado por Chou, Chen e Nguyen (2013), no âmbito do fluxo de calor através do telhado, permitiu chegar às mesmas conclusões. Estando o fluxo de calor, através do telhado, com a maioria do contributo para o ganho total de calor do edifício, quando se trata de uma cobertura em metal (fig.15) Chou, Chen e Nguyen apresentaram um novo design para a estrutura de telhados de placa de metal (fig.16) com o intuito de melhorar a resistência térmica total.

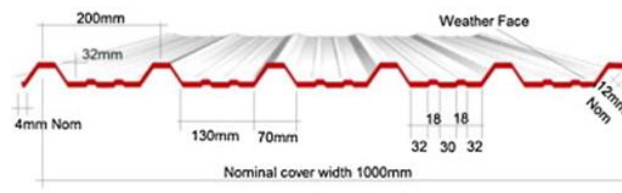


Figura 15 – Cobertura de em metal tradicional (Chou, Chen e Nguyen, 2013)

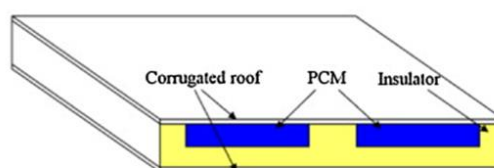


Figura 16 – Novo design da estrutura de telhados de placa de metal (Chou, Chen e Nguyen, 2013)

Este desenho tira proveito das propriedades do material de mudança de fase: numa primeira fase absorve o fluxo de calor proveniente da radiação solar para a sala; numa segunda fase liberta-o para o exterior por meio de uma convecção externa favorecida pela variação de temperatura durante o ciclo noturno. Usando-se 1kg de PCM, com temperatura de fusão de 46,3 ° C e capacidade de calor latente de 90 kJ para cobrir 48% da superfície do telhado com temperatura ambiente de 25°C, conseguir-se obter uma poupança de energia que chegou a 52,7 %, comparada com os 43,1 % alcançados com a típica cobertura em metal tradicionalmente usada. O novo design ajudou a controlar melhor a temperatura interna do ar,

conservando a baixa temperatura por um período de tempo maior e diminuindo o pico de temperatura da sala comparativamente com a cobertura de chapa de metal.

Para melhor compreensão do funcionamento dos sistemas de arrefecimento passivo apresenta-se de seguida apresentar um caso prático de um projeto de pesquisa chamado MECLIDE (Álvarez et al., 2013). As soluções MECLIDE têm como objetivo reduzir os gastos de energia de arrefecimento em edifícios através do armazenamento e de uma evacuação controlada do calor. Esta solução utiliza PCM em recipientes que se encontram localizados dentro de uma câmara de ar, onde o ar é movido com fluxo variável através do fenómeno da convexão forçada. Os recipientes onde o PCM é incorporado são feitos de um material que não reage com o PCM, podendo apresentar a forma de barbatanas, cilindros e esferas. As figuras 17 e 18 mostram as soluções de MECLIDE utilizadas neste teste.

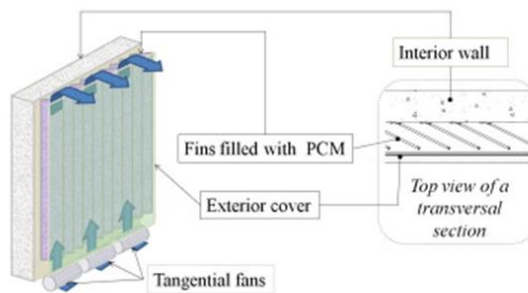


Figura 17 – Esquema construtivo de uma parede com a solução MECILDE (Álvarez et al. 2013)

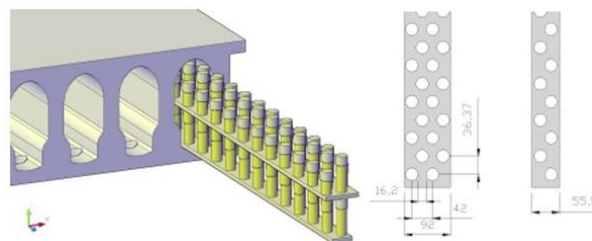


Figura 18 – Recipientes cilíndricos contendo PCM na câmara de ar (Álvarez et al., 2013)

As soluções MECLIDE operam em 3 modos durante o ciclo de 24h. Temos numa primeira fase o modo “dia” em que existe a recirculação do ar quente dentro do edifício com o objetivo de refrigerá-lo. Nesta altura o frio armazenado no material de mudança de fase é elevado sendo assim utilizado para reduzir o consumo de energia fig.19.

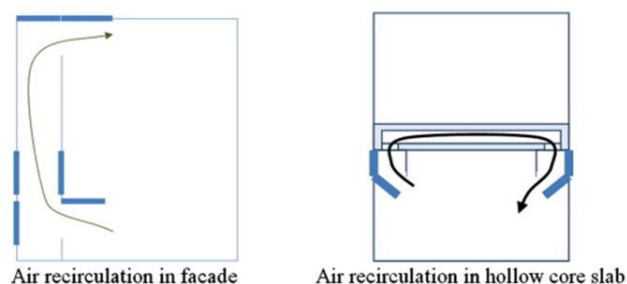


Figura 19 – Modo “dia” com a recirculação do ar quente (Álvarez et al., 2013)

Durante os períodos inativos (intervalos de tempo em que o fluxo de ar para) todas as entradas de ar são fechadas (fig.20) para se manter armazenado o frio acumulado durante a noite e aguardar que as condições externas permitam extrair, novamente, o calor armazenado durante o dia a temperaturas mais elevadas.

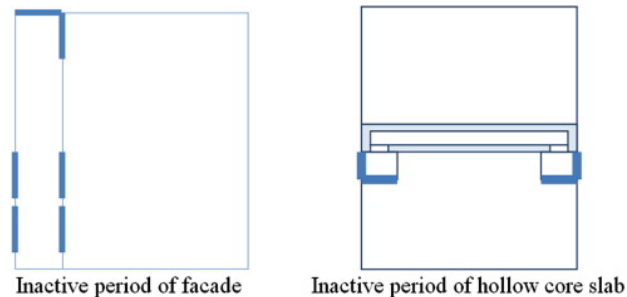


Figura 20 – Períodos inativos com as entradas de ar fechadas (Álvarez et al.,2013)

No modo “noite” a circulação de ar é feita de “fora para fora”, ou seja, o ar entra por uma extremidade e sai pela outra (fig.21). Neste período o ar frio é armazenado no PCM.

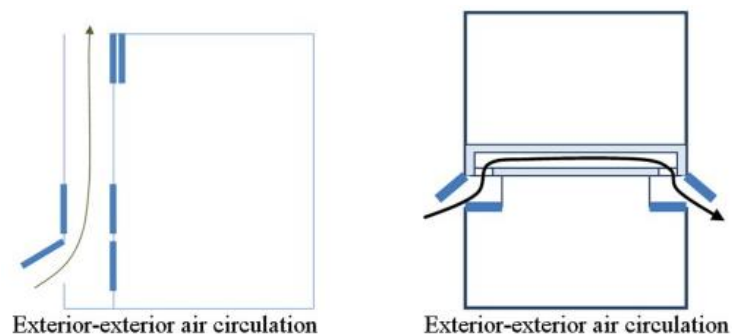


Figura 21 – Modo “noite” com a circulação do ar(Álvarez et al., 2013)

Uma característica saliente desta solução é o facto de a área de transferência de calor do PCM, com o ar, ser maior que a área ocupada pela solução.

Assim, afim de percebermos melhor o desempenho deste projeto foram estudadas 4 soluções:

- Solução 1: PCM microencapsulado numa superfície interior do edifício;
- Solução 2: PCM microencapsulado numa superfície interior de uma fachada ventilada;
- Solução 3: Fachada ventilada com barbatanas preenchido com PCM (solução MECILDE);
- Solução 4: Cilindros PCM em lajes de núcleo oco (solução MECILDE);

Após a análise dos quatro casos obtiveram-se os seguintes resultados apresentados

Tabela 7 – Resultados das quatro soluções analisadas

| Solução | Potência de arrefecimento (W/m ² de solução) |
|-----------|--|
| Solução 1 | 13 |
| Solução 2 | 60 |
| Solução 3 | 227 |
| Solução 4 | 632 |

Desta forma pode-se concluir que as soluções MECILDE revelam-se mais vantajosas do que as soluções atualmente analisadas no que toca a capacidade de armazenamento de e poder de arrefecimento em edifícios. Outro grande ponto a favor desta solução é que pode ser facilmente incorporado na construção de novos edifícios e na construção de remodelação.

3.3. AQUECIMENTO PASSIVO EM EDIFÍCIOS

No aquecimento passivo de edifícios os materiais de mudança de fase têm tido uma maior procura. Com uma grande diversidade de aplicação em componentes de construção como telhados, paredes e pisos, estes materiais absorvem o calor solar durante o dia e libertam-no durante a noite através dos processos de fusão e solidificação, característicos destes materiais, resultando no aquecimento ambiente interior do edifício, em estações frias, reduzindo desta forma os gastos energéticos com aquecimento.

Athienitis et al. (1997) incorporou PCM em gesso para revestir as paredes interiores de uma sala de teste tendo concluído que esta aplicação ajudou a diminuir a carga de aquecimento durante a noite e evitar o sobreaquecimento durante o dia. Muitos outros estudos divulgados apresentam resultados bastantes positivos nesta temática.

Num caso prático de um estudo realizado por Cerón, Neila e Khayet (2011) , aplicou-se PCM em ladrilhos grés rústicas no chão de uma sala bioclimática a fim de conseguir conservar a temperatura e reduzir o consumo de energia, durante a noite, para o aquecimento.

Neste teste foram utilizados ladrilhos compostas por 20 cm de cerâmica, chapa metálica de 3mm, um recipiente em metal com 32 mm de espessura onde ficam incorporados os 4,8 litros da mistura de parafina (PCM) e finalmente uma camada de isolamento térmico de 22mm de espessura, como se vê na fig.22.

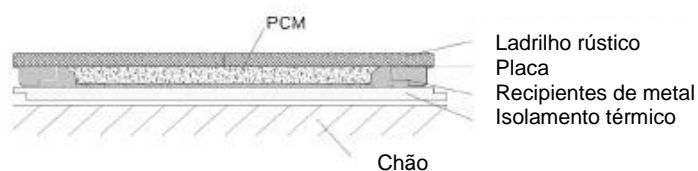


Figura 22 – Esquema construtivo de um ladrilho grés rústico contendo PCM (Cerón, Neila e Khayet, 2011)

Foram aplicados no chão da sala bioclimática 27 modelos dos quais 3 peças foram preenchidas sem o PCM de forma a se poderem realizar as medições em simultâneo, nas mesmas condições, para uma posterior comparação dos resultados. A temperatura foi medida continuamente na superfície dos ladrilhos com e sem PCM num dia de Inverno tendo-se obtido o gráfico representado na figura 23.

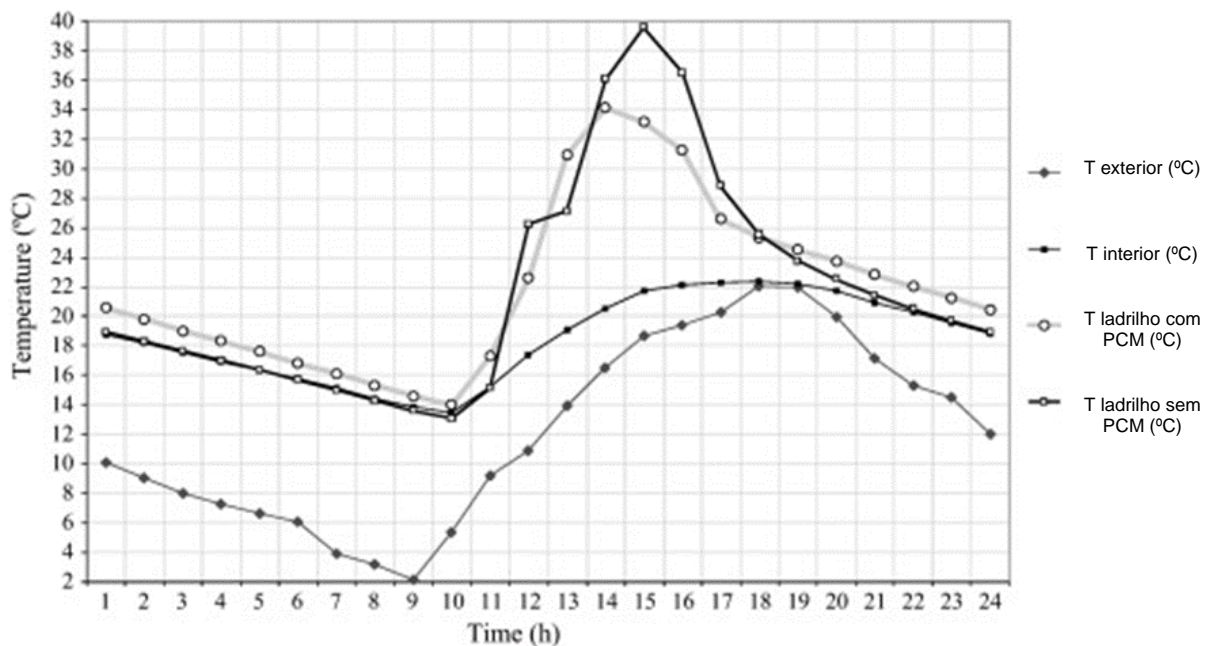


Figura 23 – Gráficos com as temperaturas horárias nas superfícies dos ladrilhos com e sem PCM num dia de Inverno (Cerón, Neila e Khayet, 2011)

Pela análise do gráfico anterior, pode-se constatar que os ladrilhos sem PCM atingem a temperatura mais alta nas horas de pico solar. Por outro lado, vê-se que quando a temperatura no exterior começa a baixar as telhas com PCM garantem maior armazenamento de energia para o ambiente. O aumento da temperatura na superfície das telhas com PCM atinge valor cerca de 1,5°C a 2,0°C a cima das telhas sem PCM.

Desta forma, conclui-se que os ladrilhos com PCM e isolamento térmico, no chão de uma casa que recebe diretamente a radiação solar, são boas armazenadoras de energia podendo ser usados como sistemas de aquecimento passivo, durante a estação fria, para a estabilização da temperatura interior e diminuição dos gastos em energia durante a noite.

Noutro caso de estudo (Park et al., 2019), com a aplicação do PCM numa cortina de vidro, mostra-se como esta solução apresenta bastantes benefícios funcionando como sistema passivo de aquecimento.

Como se sabe, grande parte das perdas de energia de um edifício são através das janelas de vidro, como tal, um grupo de investigadores tratou de analisar a aplicação de PCM em sistemas GCW (Glass curtain wall building). De forma a diminuir os gastos de energia presentes nestes sistemas de vidro devido à baixa resistência térmica, foram simulados no programa, EnergyPlus, dois edifícios semelhantes uma com as paredes CWB (Conventional wall-based building) e outro com GCW com o PCM integrado nas divisões internas como mostra a fig.24:

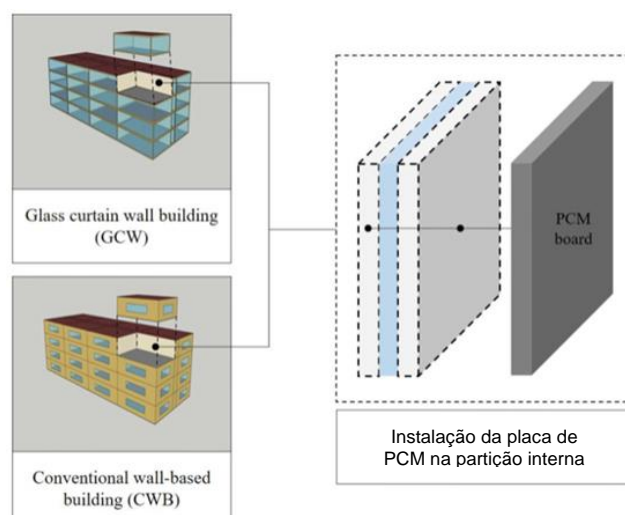


Figura 24 – Esquema construtivo de uma cortina de vidro contendo PCM (Park et al., 2019)

Tabela 8 – Composição das paredes dos edifícios estudados

| | Espessura | Condutibilidade Térmica | Densidade | Capacidade de Calor Específico | R-valor |
|--|-----------|-------------------------|----------------------|--------------------------------|-----------------------|
| | (mm) | (W/mK) | (Kg/m ³) | (J/Kg·K) | (m ² ·K/W) |
| Parede exterior do edifício CWB | | | | | |
| Estuque | 19 | 1,35 | 1858 | 840 | - |
| Placa de gesso cartonado | 15,9 | 0,16 | 640 | 1150 | - |
| Isolamento de palca | 85,6 | 0,04 | 160 | 840 | - |
| Placa de gesso | 15,9 | 0,16 | 640 | 1150 | - |
| Parede exterior do edifício GCW | | | | | |
| Vitrificação | - | - | - | - | 0,32 |
| Divisão interna | | | | | |
| Placa PCM | 25 | 0,21 | 926 | 1662 | - |
| Abertura de ar | 10 | - | - | - | 0,15 |
| Placa PCM | 25 | 0,21 | 926 | 1662 | - |

Neste estudo foram utilizados 3 locais climáticos (Miami, Duluth, Baltimore). A escolha destes locais foi feita com o intuito de serem avaliados o aquecimento e consumo de energia com a variante de climas muito quentes, moderados e frios.

Após a introdução de todos os dados, obteve-se o seguinte gráfico:

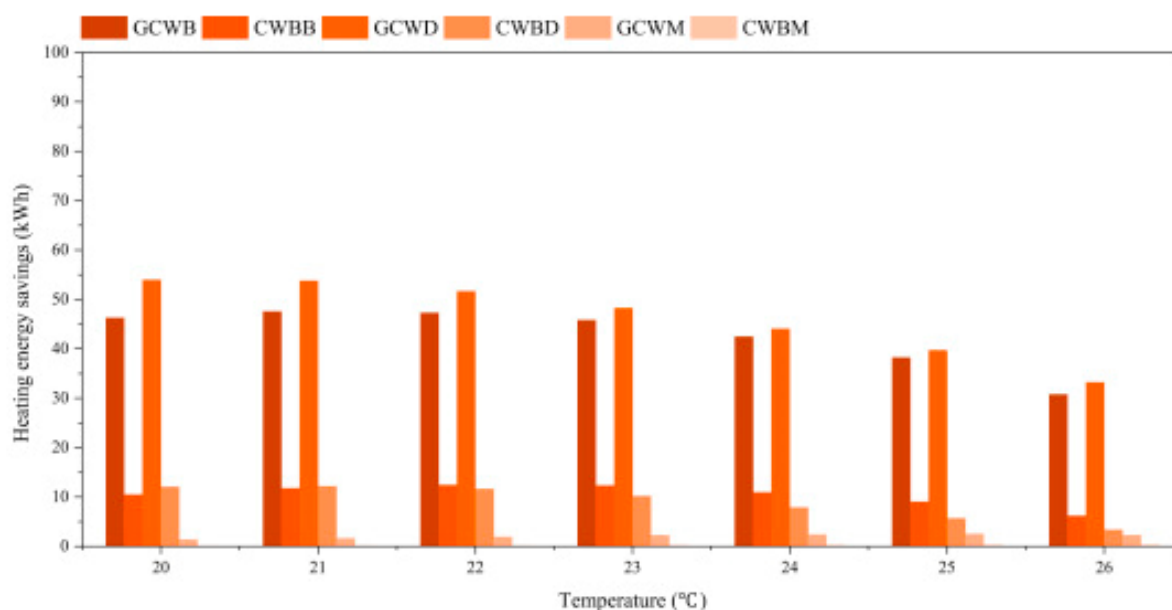


Figura 25 – Resultados da poupança de energia apresentado pelos dois edifícios para os três locais em análise (Park et al.,2019)

O gráfico da fig.25, apresenta a energia poupada em aquecimento para cada um dos 3 locais nos dois tipos de edifícios estudado. Pela análise dos dados, facilmente percebe-se que as soluções GCW apresentam um melhor desempenho na poupança de energia para aquecimento quando comparadas com as tradicionais soluções (CWB). Isto pode ser explicado pela grande quantidade de ganhos solares que entram a partir da cortina de vidro durante o dia, levando o PCM à mudança de fase, permitindo eficiência na conservação do calor com a queda da temperatura diária. Ainda de analisar o facto de a economia de energia em Miami (local de clima quente) ser relativamente inferior aos restantes locais, apenas cerca de 2,5 KWh por ano. Isto pode ser explicado pelas altas temperaturas anual impedir a mudança de fase do PCM.

4

ESTUDO EXPERIMENTAL

4.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo será apresentado o caso de estudo realizado nesta dissertação. O objetivo deste estudo será perceber como o material de mudança de fase, sendo um material térmico, se comporta como material acústico. Assim sendo iremos determinar, primeiramente, o coeficiente de absorção sonora do PCM em estudo para depois, no capítulo seguinte, procedermos à análise e discussão dos valores obtidos.

Existem diversos modelos teóricos para o cálculo da absorção sonora como o modelo de Delany e Bazley, modelo de Mechel e ainda modelo de Attenborough. Tratando-se do estudo de um material com propriedades térmicas e apresentando algumas características próprias, como a sua mudança de estado, optou-se por esse motivo por um modelo experimental para a obtenção da absorção sonora o ensaio do Tudo de Ondas Estacionárias. Este ensaio apresenta a vantagens de utilizar apenas amostras de pequenas dimensões, o que facilita a realização do trabalho e ainda ser um ensaio de curta duração, ótimo quando se trata de um ensaio simples com poucas amostras disponíveis, como é o caso.

Neste capítulo será feita uma breve introdução aos conceitos de absorção sonora para melhor compreensão desta temática, sendo de seguida apresentada toda a metodologia necessária para a realização do ensaio e obtenção dos dados pretendidos.

4.2. ABSORÇÃO SONORA

Quando uma onda sonora incide num determinado material, a energia contida nessa mesma onda pode ser refletida, absorvida e ainda transmitida por esse mesmo material (fig.26). Assim, define-se absorção sonora como a capacidade que os materiais têm de poder transformar parte da energia sonora noutra forma de energia, normalmente em calor.

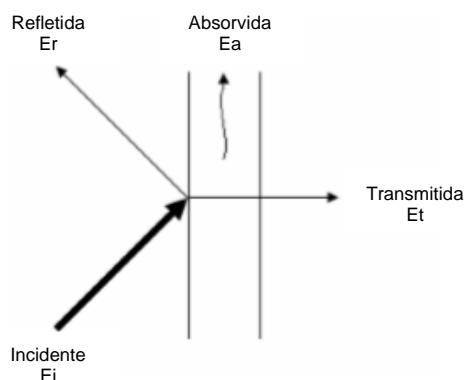


Figura 26 – Esquema ilustrativo da energia sonora a incidir num material

A absorção sonora depende de vários fatores como a densidade e espessura do material, do ângulo de incidência das ondas sonoras na superfície desse material e das condições de aplicação do sistema que o integra. A absorção sonora dos materiais é avaliada pelo coeficiente de absorção sonora (α). Por definição o coeficiente de absorção sonora é a razão entre a energia, que por unidade de tempo, se dissipa numa dada área da superfície do material e a energia incidente nessa área no mesmo intervalo de tempo.

Assim tem-se a seguinte expressão:

$$E_i = E_t + E_r + E_a \quad (4.1)$$

Somando a energia transmitida com a energia absorvida e dividindo a equação por E_i ,

$$1 = \frac{E_r}{E_i} + \frac{E_t + E_a}{E_i} \quad (4.2)$$

Desta forma obtém-se os chamados coeficiente de reflexão (α_r) e absorção sonora (α_θ):

$$1 = \alpha_r + \alpha_\theta \quad (4.3)$$

Os valores dos coeficientes de absorção sonora variam entre um mínimo de 0 e um máximo de 1, onde um material que possua um coeficiente de absorção sonora de 0,30 quer dizer que absorve 30% da energia que sobre ele incide, refletindo os restantes 70%.

O coeficiente de absorção sonora de um material varia consoante a frequência (Hz) do som incidente, sendo que para as diferentes bandas de frequência é determinado o coeficiente de absorção sonoro médio.

4.3. MÉTODOS DE DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE ABSORÇÃO SONORA

4.3.1. INTRODUÇÃO

O conhecimento das propriedades acústicas de um material é importante para a obtenção de um bom desempenho acústico nos edifícios. Os modelos teóricos desenvolvidos até hoje não têm vindo a ser alvo de estudo por parte dos investigadores, com tudo a obtenção dos valores do coeficiente de absorção sonora dos materiais têm sido estudados através de modelos experimentais como é o caso do modelo Câmara Reverberante e o modelo do Tubo de Ondas Estacionárias.

No que toca ao método do Tubo de Ondas Estacionárias, muito utilizado em meados do século passado, sofreu pequenas alterações tendo evoluído simplesmente ao nível de automatização do equipamento e no processo de cálculo. É uma metodologia prática com inúmeras vantagens, como aqui já foram referidas, fazendo dele um método com vasta utilização quando se prende uma análise rápida e prática.

A determinação do coeficiente de absorção sonora de um material pode ser obtida utilizando um tubo de ondas estacionárias, de acordo com o especificado na norma ISO 10534-1:1996. A referida norma contém descrita toda a metodologia para a obtenção do coeficiente de absorção sonora em estudo, permitindo também determinar outras propriedades acústicas como impedância, admitância e o fator de reflexão do material, propriedades essas que não iremos abordar neste ensaio.

Este método difere do conhecido método da Câmara Reverberante no facto do som apenas incidir perpendicularmente na amostra em estudo, sendo apenas necessário um modelo de pequenas dimensões (tamanho da secção do tubo), ao contrário do Método da camara reverberante que necessita de uma amostra na ordem de cerca de 10m^2 , sendo a dimensão o principal benefício da utilização do método do Tudo de Ondas Estacionárias. Relativamente ao método da Câmara Reverberante, não utilizado neste trabalho, é a metodologia mais recorrente para o cálculo do coeficiente de absorção sonora pois reproduz com mais fiabilidade a realidade. Contudo, como já foi referido, necessita de amostras de grandes dimensões e aliado ao facto de ser um processo demoroso não foi testado nesta dissertação.

4.3.2.O MÉTODO DO TUBO DE ONDAS ESTACIONÁRIAS

O ensaio do Tubo de ondas Estacionárias consiste num tubo metálico onde numa extremidade se encontra um gerador de sinal ligado a um altifalante, que emite uma onda sinusoidal plana em direção a outra extremidade onde se coloca a amostra a ser ensaiada. A sobreposição da onda sonora refletida na amostra com a onda sonora emitida origina a formação de uma onda estacionária dentro do tubo (onda resultante de duas ondas sinusoidais com igual amplitude, comprimento de onda, frequência, mesma direção, mas sentidos opostos). Após isso, determina-se as pressões mínimas (P_{\min}) e máximas (P_{\max}) com a o auxílio de um sonómetro (aparelho para medição dos níveis de pressão sonora) registando-se também distância (X_{\min}) (fig.27) a que a primeira pressão mínima ocorre na amostra, podendo assim ser determinadas as propriedades acústicas do material pretendidas.

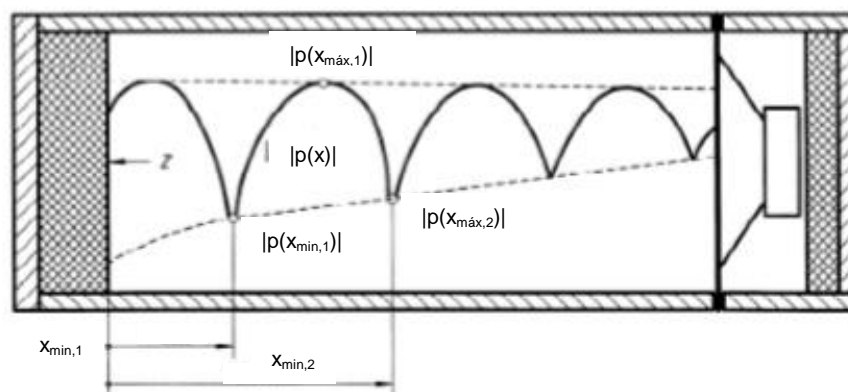


Figura 27 – Ilustrações das medições de pressão e distância a realizar no ensaio do Tubo de Ondas Estacionárias (Martins G.V.C.P. 2008)

4.3.3.CÁLCULO DO COEFICIENTE DE ABSORÇÃO SONORA

Visto que neste capítulo o objetivo é determinar uma das propriedades acústicas do material em estudo, ou seja, o coeficiente de absorção sonora vai-se neste subcapítulo descrever os procedimentos analíticos para a sua determinação.

4.3.3.1.Intervalo de frequências de trabalho

O intervalo a ser estudado num tubo de impedância (sistema para a análise e obtenção das propriedades acústicas dos materiais ensaiados), $f_1 < f < f_u$, é determinado em função da sua secção e dimensão transversal.

Assim, para se obter as duas pressões mínimas no tubo de impedância com comprimento de tubo, l , no limite inferior de frequência, f_1 , vai-se recorrer à seguinte relação com o comprimento de onda (λ_0):

$$l \geq 3 \lambda_0 / 4 \quad (4.4)$$

O comprimento entre a face da amostra em estudo e o altifalante, l , para o limite inferior de frequência, f_1 , deve estar de acordo com a seguinte equação:

$$l \geq 250 / f + 3d \quad (4.5)$$

onde:

f – Frequência (Hz)

d – Diâmetro interior do tubo circular (m)

Esta limitação inferior tem como objetivo assegurar que, uma possível existência de ondas com frequências superior às pretendidas para análise (originadas pelo altifalante ou por objetos cujas propriedades acústicas variem lateralmente), não venham a afetar as medições realizadas.

Relativamente ao limite superior da frequência, f_u , também ele tem um propósito garantir que não se gerem ondas transversais no tubo que possam influenciar os resultados. Desta forma, os tubos circulares com diâmetro (d), em metros, devem respeitar as seguintes expressões:

$$d \leq 0,58 \lambda_0 \quad (4.6)$$

$$f_u d \leq 200 \quad (4.7)$$

4.3.3.2. Atenuação do Tubo de Ondas Estacionárias

Para se evitarem erros nas medições é necessário ter em conta as atenuações do tubo para obtermos um valor mais correto do coeficiente de absorção sonora. Assim, deve-se determinar a constante de atenuação, k_0'' , para cada frequência com o tubo vazio. Medem-se as pressões mínimas $p(\min, n)$ e $p(\min, n+1)$, bem como a pressão máxima entre estes dois mínimos $p(x_{\max, n})$ para $n=1, 2, 3 \dots$ e calcula-se a seguinte expressão:

$$\Delta_n = \frac{|p(x_{\min, n+1})| + |p(x_{\min, n})|}{|p(x_{\max, n})|} = 2 \sinh \left(\frac{k_0'' \lambda_0}{4} \right) \quad (4.8)$$

Obtendo-se:

$$k_0'' = \frac{4}{\lambda_0} \operatorname{arcsinh} \frac{\Delta_n}{2} \quad (4.9)$$

Caso não seja possível determinar dois valores de pressão mínima com precisão suficiente (como acontece no caso das baixas frequências onde é requerido um comprimento do tubo elevado devido ao

elevado comprimento de onda para essas frequências), o valor da constante de atenuação do tubo pode ser determinada do seguinte modo:

$$K_0'' = 1,94 \times 10^{-2} \left(\sqrt{\frac{f}{c_0}} \times d \right) \quad (4.10)$$

Em que,

f – é a frequência (Hz)

d – é o diâmetro para tubos circulares (m)

c_0 – velocidade de propagação do som (m/s)

4.3.3.3. Cálculo do coeficiente de absorção da amostra

Com a colocação da amostra no tubo de ondas estacionárias registam-se, para cada frequência emitida pelo gerador de sinal, os valores da $p_{\min,n}$, a distancia a que este ocorre, $x_{\min,n}$, e ainda o valor da pressão máxima $p_{\max,n}$.

Medindo-se os valores da pressão sonora, no tubo de impedância, numa escala logarítmica (em dB), é possível determinar a variação de pressão, ΔL , entre o seu máximo e o mínimo, bem como o rácio da onda estacionária, S_n , necessário para o cálculo da magnitude do fator de reflexão, $|r|$:

$$S_n = 10^{\Delta L / 20} \quad (4.11)$$

$$|r| = e^{2k_0'' x_{\min,n}} \frac{S_n - e^{-k_0'' \lambda_0 / 4}}{S_n + e^{-k_0'' \lambda_0 / 4}} \quad (4.12)$$

Com o valor da magnitude do fator de reflexão, $|r|$, determinado pudemos assim determinar o coeficiente de absorção sonora para uma incidência normal, α_n , pela expressão abaixo:

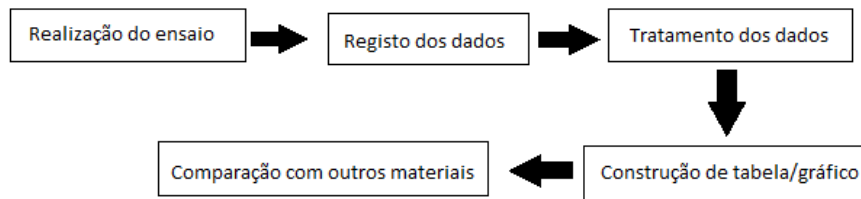
$$\alpha_n = 1 - |r|^2 \quad (4.13)$$

4.4. PROCEDIMENTO LABORATORIAL EXPERIMENTAL

4.4.1. INTRODUÇÃO

Neste subcapítulo será apresentado todo o procedimento realizado para a obtenção do coeficiente de absorção sonora do PCM em estudo, segundo o modelo do Tubo de ondas Estacionárias, procedimento adotado na realização desta dissertação.

Com o recurso às fórmulas, apresentadas anteriormente e a utilização da ferramenta de calculo, Microsoft Excel, serão registados e tratados todos os dados obtidos nas leituras realizadas durante o ensaio. Posteriormente será obtida uma tabela com os valores do coeficiente de absorção sonora, bem como o respetivo gráfico para que possam ser analisados e comparados com outros materiais.



4.4.2. CÁLCULO DO COEFICIENTE DE ABSORÇÃO

4.4.2.1. Procedimento do ensaio

Para o cálculo do coeficiente de absorção sonora do PCM em estudo foi utilizado o equipamento disponibilizado pelo o laboratório da F.E.U.P. (Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto) sendo eles:

- Tubo de Ondas Estacionárias Brüel & Kjaer TYPE 4002 (fig.28 esquerda);
- Fonte Brüel & Kjaer TYPE 1024 (fig.28 direita);
- Sonómetro Brüel & Kjaer 2231 (verificado no ISQ –Bol. Ver. 12/70338 de 29 de Novembro de 2007, (fig.28 meio).



Figura 28 – Equipamentos utilizados no ensaio laboratorial

Para proceder à realização do ensaio, primeiramente, foi colocado no tubo de impedância a amostra de PCM a ser analisada, definindo-se as diferentes frequências a serem estudados através do gerador de sinal, que transmite uma onda pelo altifalante, formando se um campo de ondas estacionárias.

Seguidamente desloca-se o carrinho, que contém no seu interior um microfone ligado ao sonómetro, e medem-se as pressões máxima e mínimas encontradas registando-se também a distância mínima a que ocorre através da posição do carrinho na régua.



Figura 29 – Funcionamento do ensaio experimental do Tubo de Ondas Estacionárias

4.4.2.2. Adoção do tipo de tubo a utilizar consoante as frequências de trabalho a estudar

Foi necessário adequar o tubo para as diferentes frequências emitidas. Dessa forma, utilizaram-se dois tubos de secção transversal circular, com as dimensões apresentadas na tabela 8.

Tabela 9 – Dimensões dos tubos utilizados nos ensaios

| Tipo de tubo | Comprimento (l) | Diâmetro (d) |
|--------------|-----------------|--------------|
| Tubo pequeno | 0,30 m | 0,03 m |
| Tubo grande | 1,0 m | 0,10 m |

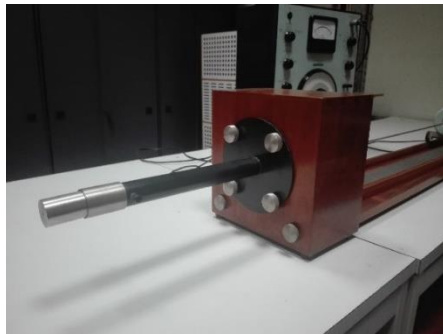


Figura 30 – Tubos utilizados nos ensaios para as medições das diferentes frequências sonoras

Para saber qual dos tubos usar em cada frequência de ondas, utilizaram-se as equações (4.4) a (4.7), e obtivemos a seguinte tabela:

Tabela 10 – Cálculos realizados para a escolha do tubo de acordo com a frequência sonora a ser ensaiada

| Frequência (Hz) | c_0 (m/s) | λ_0 (m) | Tubo grande l=1 m; d=0,10 | | | | Tubo Pequeno l=0,30 m d=0,03 | | | |
|-----------------|-------------|-----------------|---------------------------|-------------------|-------------------------------|----------------------|------------------------------|-------------------|-------------------------------|----------------------|
| | | | $l \geq 3\lambda_0/4$ | $l \geq 250/f+3d$ | $d \leq 0,58 \cdot \lambda_0$ | $f \cdot d \leq 200$ | $l \geq 3\lambda_0/4$ | $l \geq 250/f+3d$ | $d \leq 0,58 \cdot \lambda_0$ | $f \cdot d \leq 200$ |
| 100 | 343,3 | 3,43 | 2,57 | 2,80 | 1,99 | 10,00 | 2,57 | 2,59 | 1,99 | 3,00 |
| 125 | 343,3 | 2,75 | 2,06 | 2,30 | 1,59 | 12,50 | 2,06 | 2,09 | 1,59 | 3,75 |
| 160 | 343,3 | 2,15 | 1,61 | 1,86 | 1,24 | 16,00 | 1,61 | 1,65 | 1,24 | 4,80 |
| 200 | 343,3 | 1,72 | 1,29 | 1,55 | 1,00 | 20,00 | 1,29 | 1,34 | 1,00 | 6,00 |
| 250 | 343,3 | 1,37 | 1,03 | 1,30 | 0,80 | 25,00 | 1,03 | 1,09 | 0,80 | 7,50 |
| 315 | 343,3 | 1,09 | 0,82 | 1,09 | 0,63 | 31,50 | 0,82 | 0,88 | 0,63 | 9,45 |
| 400 | 343,3 | 0,86 | 0,64 | 0,93 | 0,50 | 40,00 | 0,64 | 0,72 | 0,50 | 12,00 |
| 500 | 343,3 | 0,69 | 0,51 | 0,80 | 0,40 | 50,00 | 0,51 | 0,59 | 0,40 | 15,00 |
| 630 | 343,3 | 0,54 | 0,41 | 0,70 | 0,32 | 63,00 | 0,41 | 0,49 | 0,32 | 18,90 |
| 800 | 343,3 | 0,43 | 0,32 | 0,61 | 0,25 | 80,00 | 0,32 | 0,40 | 0,25 | 24,00 |
| 1000 | 343,3 | 0,34 | 0,26 | 0,55 | 0,20 | 100,00 | 0,26 | 0,34 | 0,20 | 30,00 |
| 1250 | 343,3 | 0,27 | 0,21 | 0,50 | 0,16 | 125,00 | 0,21 | 0,29 | 0,16 | 37,50 |
| 1600 | 343,3 | 0,21 | 0,16 | 0,46 | 0,12 | 160,00 | 0,16 | 0,25 | 0,12 | 48,00 |
| 2000 | 343,3 | 0,17 | 0,13 | 0,43 | 0,10 | 200,00 | 0,13 | 0,22 | 0,10 | 60,00 |
| 2500 | 343,3 | 0,14 | 0,10 | 0,40 | 0,08 | 250,00 | 0,10 | 0,19 | 0,08 | 75,00 |
| 3150 | 343,3 | 0,11 | 0,08 | 0,38 | 0,06 | 315,00 | 0,08 | 0,17 | 0,06 | 94,50 |
| 4000 | 343,3 | 0,09 | 0,06 | 0,36 | 0,05 | 400,00 | 0,06 | 0,15 | 0,05 | 120,00 |
| 5000 | 343,3 | 0,07 | 0,05 | 0,35 | 0,04 | 500,00 | 0,05 | 0,14 | 0,04 | 150,00 |

| | |
|--|--|
| | Valores para os quais correspondem frequências que podem ser estudadas no Tubo grande |
| | Valores para os quais correspondem frequências que podem ser estudadas no Tubo pequeno |
| | Valores para os quais correspondem frequências que não podem ser estudados em nenhum dos tubos |
| | Valores para os quais correspondem frequências que podem ser estudadas em ambos os tubos |

Analisando a tabela anterior (tabela 9) conclui-se que cada tubo pode ser utilizado nos seguintes intervalos de frequências:

- Tubo pequeno: $1250 \leq f \leq 5000$ (Hz);
- Tubo grande: $400 \leq f \leq 1600$ (Hz);

Assim, como neste trabalho foram medidos os valores da absorção sonora para as frequências da oitava banda (125, 250, 500, 1000, 2000 e 4000 Hz) e não havendo um tubo com comprimento superior, utilizamos o tubo grande para as frequências de 125 e 250 Hz embora não tivesse as dimensões adequadas para se estudar os valores com mais precisão.

Concluindo, o tubo grande foi utilizado para as frequências de 125, 250, 500 e 1000 Hz e o tubo pequeno para as frequências de 2000 e 4000 Hz.

4.4.2.3. Atenuação do tubo

Para a obtenção de valores do coeficiente de absorção sonora mais próximos da realidade seria necessário calcular a atenuação do tubo através da expressão (4.10) pois, como já foi referido, a impossibilidade de determinar dois valores mínimos de pressão sonora consecutivos nas baixas frequências devido ao tubo utilizado não apresentar as dimensões mais adequadas.

Assim, para simplificação dos cálculos recorreu-se à expressão empírica (4.14) e após a obtenção do valor do S_n através da equação (4.11) determinou-se diretamente os coeficientes de absorção sonora.

$$\alpha_n = \frac{4 \times S_n}{(S_n + 1)^2} \quad (4.14)$$

Tendo apenas como objetivo uma caracterização geral do comportamento acústico do PCM, os resultados obtidos através desta simplificação serão suficientes para as conclusões que se pretende tirar, embora com o devido cálculo da atenuação obter-se-ia resultados mais exatos.

4.4.2.4. Amostra utilizada e medições realizadas

Para a realização deste ensaio apenas foram utilizadas amostras do PCM RT 18 HC pois não havia mais nenhum disponível, sendo que seria importante ter-se analisado amostras de outros PCM para que se pudesse calcular as propriedades acústicas numa maior diversidade de PCM. Este PCM tem uma capacidade de armazenamento de calor de $\varnothing = 260$ kJ / kg e uma temperatura de fusão a 18° C. Em anexo encontram-se detalhas, em catálogo, as características do PCM RT 18.

Neste ensaio surgiram algumas dificuldades pois como se analisou um PCM com um ponto de fusão à temperatura ambiente 18° C tivemos de o manter num frigorífico, para que se mantivesse no estado sólido, até a altura do ensaio. Outra dificuldade surgida foi o facto da experiência ter sido realizada com alguma rapidez pois o calor ambiente ia fazendo com que amostra atingisse aos poucos o ponto de fusão e não fosse possível realizar o ensaio.

Como já foi referido, foi necessário preparar duas amostras com tamanhos diferentes (fig.31) uma com as dimensões do tubo grande e outra com as dimensões do tubo pequeno ambas com uma espessura de 1,8 cm.



Figura 31 – Amostras do PCM RT 18HC utilizados nos ensaios

Numa primeira fase, colocou-se o PCM (líquido) num godé de vidro com o diâmetro ligeiramente inferior ao do tubo grande (aproximadamente 9 cm). Após isso, colocou-se esta amostra no frigorífico a uma temperatura aproximada de 7°C. Posteriormente preparou-se a amostra de PCM diretamente no tubo metálico de encaixe, na extremidade do tubo de ondas estacionárias.

Os valores das pressões mínimas e máximas medidas pelo sonómetro durante os ensaios realizados encontram-se no anexo A. Após as medições das pressões, preparou-se uma folha de cálculo Excel (anexo A), com as expressões atrás explicadas, para a determinação do coeficiente de absorção.

Concluindo, visto que se trata de um material com propriedades térmicas e se pretende apenas ficar com uma pequena ideia das suas propriedades acústicas enquanto material de construção, o estudo realizado foi suficiente para os dados que pretendemos obter e assim comparar com outros materiais utilizados na construção de edifícios.

4.4.2.5. Resultados obtidos

Nos ensaios 1 e 2 utilizou-se um godé de vidro para acomodar a amostra de PCM. Na tabela 10 podemos observar os valores registados pelo sonómetro nos ensaios 1.

Tabela 11 – Valores das pressões registados pelo sonómetro no ensaio 1

| Frequência (Hz) | P máx (dB) | P min (dB) |
|--------------------|---------------|---------------|
| 125 | 86,5 | 68,4 |
| 250 | 90,9 | 74,5 |
| 500 | 81,5 | 56,4 |
| 1000 | 87,5 | 53,3 |
| 2000 | 61,8 | 30,4 |
| 4000 | 56,1 | 30,6 |

No gráfico seguinte (fig.32) apresentam-se os valores dos coeficientes de absorção sonora para as frequências de banda de oitava de 125 Hz a 4000 Hz, após a conversão dos valores de S_n para α através da equação (4.14).

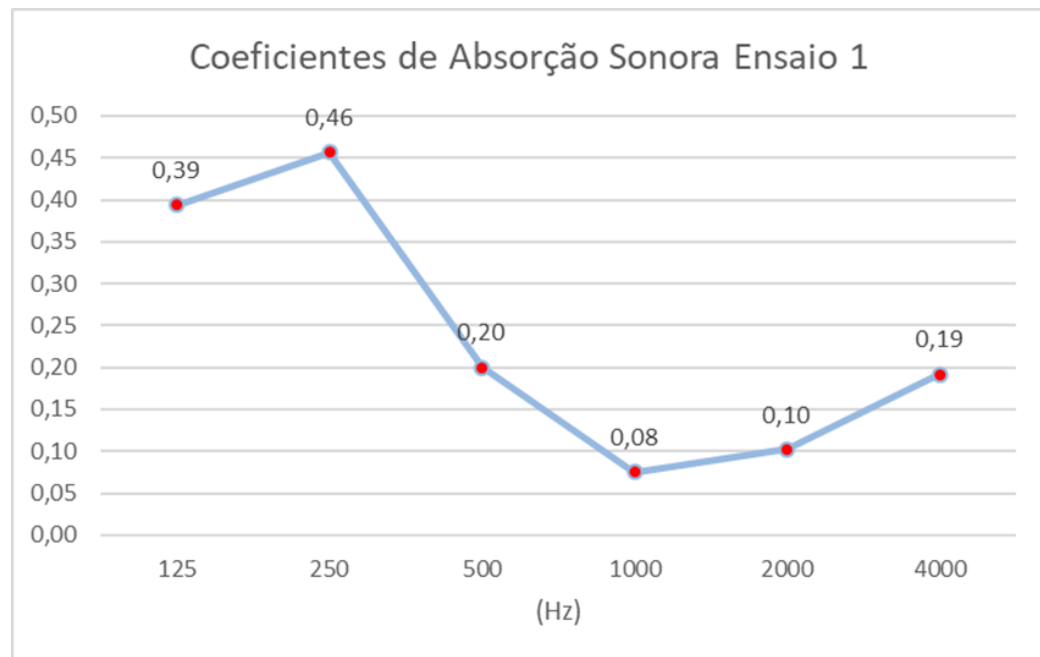


Figura 32 – Valores dos coeficientes de absorção sonora obtidos no ensaio 1

Repetiram-se todos os procedimentos obtendo os resultados referentes ao ensaio 2, expressos na tabela 11e no gráfico da fig.32.

Tabela 12 - Valores das pressões registados pelo sonómetro no ensaio 2

| Frequência (Hz) | P máx (dB) | P min (dB) |
|-----------------|------------|------------|
| 125 | 86,8 | 68,5 |
| 250 | 91,2 | 74,2 |
| 500 | 81,4 | 57,8 |
| 1000 | 87,3 | 53 |
| 2000 | 61,8 | 30,2 |
| 4000 | 55,8 | 30,5 |

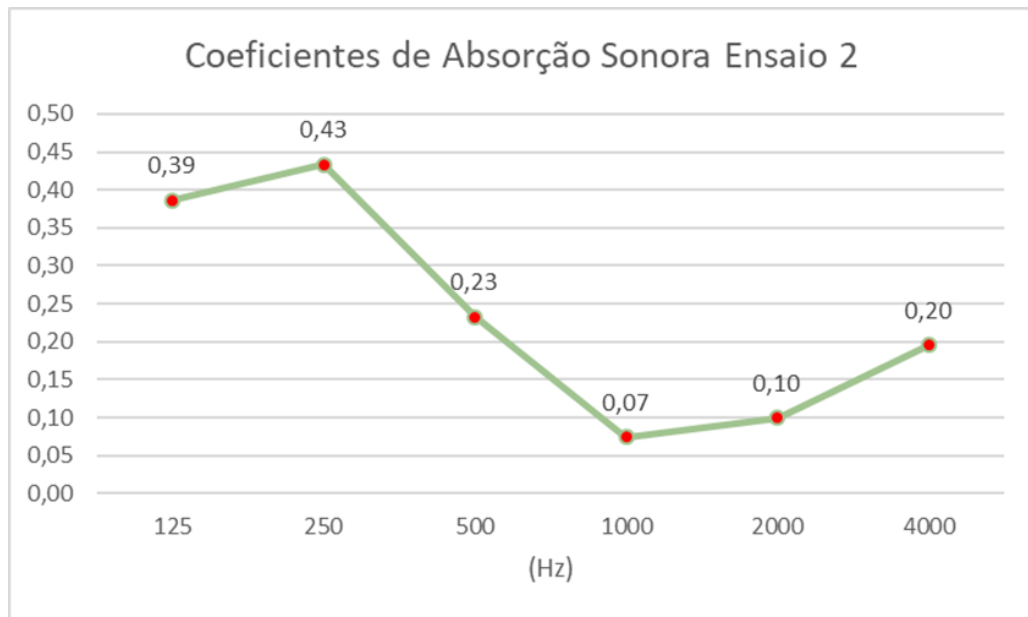


Figura 33 - Valores dos coeficientes de absorção sonora obtidos no ensaio 2

Os resultados obtidos no ensaio 1 e 2 são semelhantes para todas as bandas de frequências estudadas. No entanto, os valores da absorção sonora para a banda de frequência de 125 a 250 Hz, $\alpha=0,39$ e $\alpha=0,46/0,43$, respectivamente, causam alguma estranheza face aos resultados obtidos para as restantes frequências (500 a 4000 Hz).

Assim, numa segunda fase, os ensaios foram repetidos colocando a amostra de PCM na tampa metálica da extremidade do tubo de ondas estacionárias. Realizaram-se três ensaios repetindo todos os procedimentos. Os resultados obtidos registados na tabela 12 e representados nas figuras 34, 35 e 36 permitem verificar o ajuste da curva de absorção sonora do PCM.

Tabela 13 - Valores das pressões registados pelo sonómetro nos ensaios 3,4 e 5

| Frequência (Hz) | Ensaio 3 | | Ensaio 4 | | Ensaio 5 | |
|-----------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| | P máx (dB) | P min (dB) | P máx (dB) | P min (dB) | P máx (dB) | P min (dB) |
| 125 | 88,9 | 65 | 88,8 | 64,8 | 89 | 64,9 |
| 250 | 94 | 67,2 | 94,1 | 66,9 | 93,9 | 66,8 |
| 500 | 83,5 | 53 | 83,8 | 53,2 | 83,9 | 53,1 |
| 1000 | 76,7 | 43 | 76,5 | 42,8 | 76,7 | 42,7 |
| 2000 | 67 | 35,5 | 67,1 | 35 | 67,3 | 35,1 |
| 4000 | 65,4 | 34 | 65,3 | 33,9 | 65,7 | 33,5 |

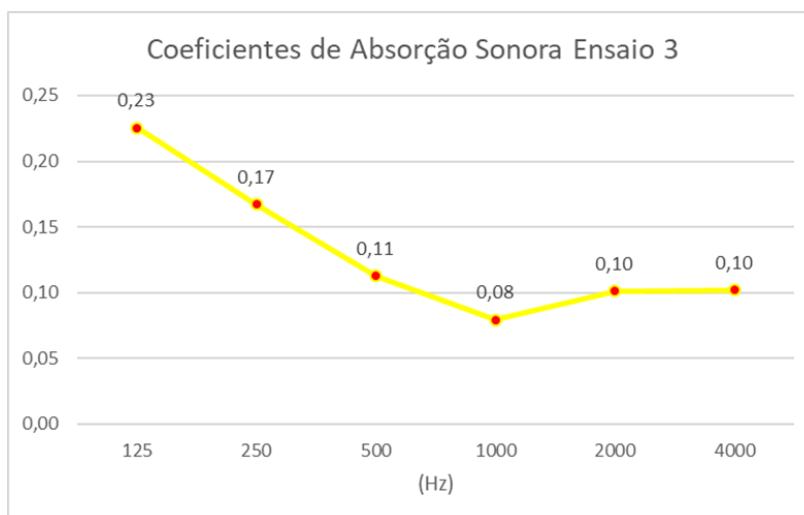


Figura 34 - Valores dos coeficientes de absorção sonora obtidos no ensaio 3

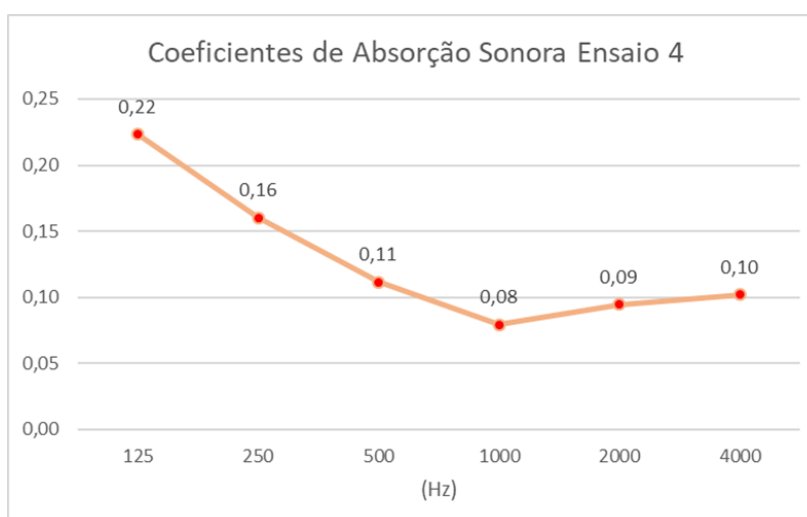


Figura 35 - Valores dos coeficientes de absorção sonora obtidos no ensaio

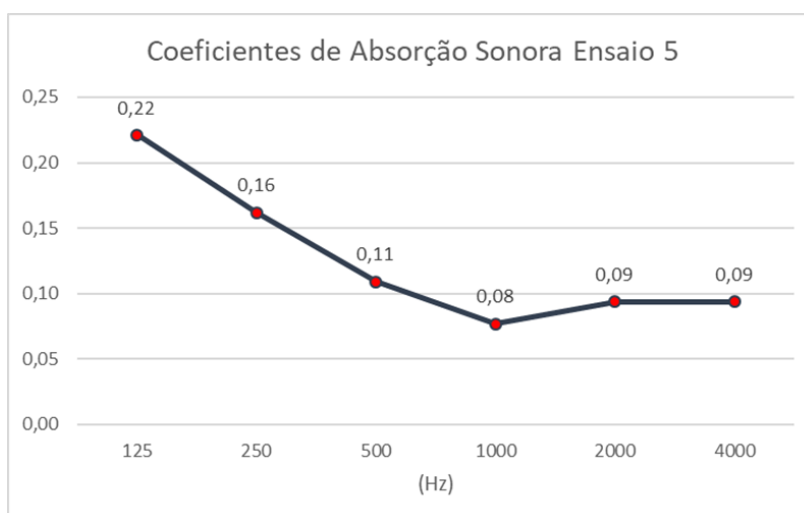


Figura 36 - Valores dos coeficientes de absorção sonora obtidos no ensaio 5

Na sequência do que foi abordado anteriormente e com o propósito de avaliar se os dados obtidos nos ensaios poderiam, de alguma forma, ser incoerentes compararam-se os valores finais dos coeficientes de absorção sonora obtidos nos 5 ensaios fig.37.

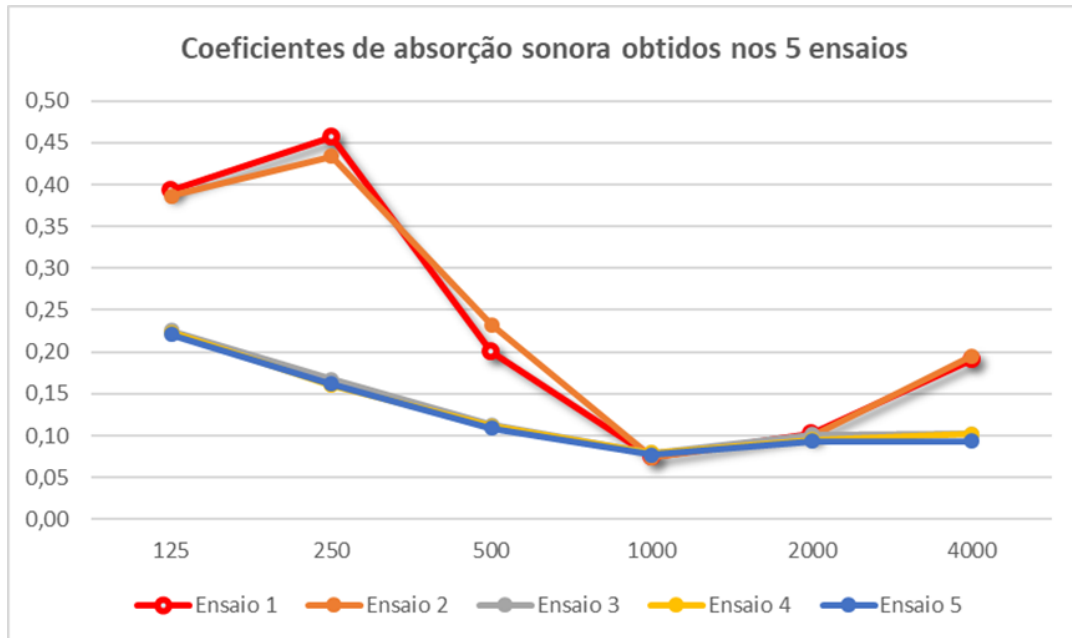


Figura 37 – Comparação dos coeficientes de absorção sonora obtidos nos cinco ensaios

Pela análise do gráfico da fig.37 pode observar-se uma diferença de aproximadamente $\Delta\alpha = 0,30$ nos valores das frequências baixas obtidos com a amostra ensaiada no godé de vidro e com a amostra ensaiada sem o godé de vidro. Assim, tendo por base valores de coeficientes de absorção sonora de materiais acústicos, desprezaram-se os valores obtidos nos dois primeiros ensaios pois apresentavam valores de coeficientes de absorção sonora muito elevados para as frequências mais baixas, o que nos conduziria a dados um pouco irrealistas.

Preconiza-se que o godé utilizado nos ensaios 1 e 2 por não garantir um encaixe perfeito ao tubo de ondas estacionárias terá criado um efeito ressoador, o que terá sido corrigido com a colocação da amostra de PCM diretamente na tampa metálica da extremidade do tubo de ondas estacionárias (ensaios 3, 4 e 5).

Deste modo, consideram-se apenas os dados resultantes dos três últimos ensaios, visto que, expressam valores mais próximos da realidade e apresentam conformidade entre as três medições realizadas, sendo que, pode-se dar como plausíveis para o estudo.

4.5. ANÁLISE DE RESULTADOS

4.5.1. INTRODUÇÃO

Após a realização dos ensaios analisaram-se os resultados de formas a perceber o desempenho do PCM a nível acústico. Para tal, numa primeira fase, compararam-se os resultados obtidos nos ensaios e discutiram-se os valores. Numa segunda fase deste capítulo, compararam-se os resultados obtidos no ensaio com outros valores de coeficientes de absorção sonoro de materiais já tabelados, utilizados na

construção de edifícios. A comparação dos valores obtidos ajudará a compreender a posição em que os PCM se encontram quando comparados com outros materiais de construção.

Optou-se por fazer a média dos valores dos coeficientes de absorção sonora, anteriormente seleccionados, e construiu-se o gráfico fig.38 final onde estão apresentadas as características do coeficiente de absorção sonora do PCM em estudo.

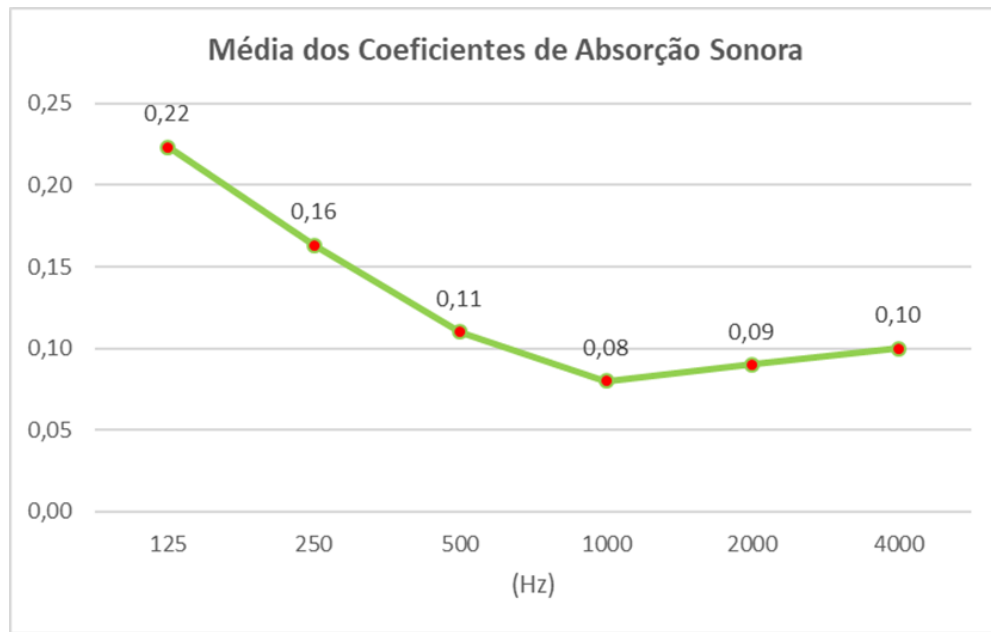


Figura 38 - Média dos coeficientes de absorção sonora obtidos nos ensaios 3,4 e 5

Após a apresentação dos resultados finais do estudo do coeficiente de absorção sonora do PCM, conclui-se que nas baixas frequências é onde apresenta o melhor desempenho acústico. Com um coeficiente de absorção a rondar, $\alpha = 0.20$, nas frequências muito baixas consegue absorver cerca de 20% da radiação emitida, sendo que, os restantes 80% serão refletidos. Relativamente às frequências de gama mais alta o seu coeficiente de absorção sonora anda na ordem de grandeza dos $\alpha = 0.10$, valor ainda bastante baixo, do que se pretende, para um bom desempenho acústico.

Conclui-se que este material, de um modo geral, apresenta baixos níveis de absorção sonora. No subcapítulo seguinte compararam-se os valores obtidos com valores de outros materiais utilizados na construção.

4.5.2.COMPARAÇÃO DO PCM ENSAIADO COM MATERIAIS ACÚSTICOS UTILIZADOS NA CONSTRUÇÃO

Com o coeficiente de absorção sonora do PCM ensaiado determinado, decidiu-se comprar os seus valores com outros materiais acústicos com o intuito de perceber realmente se este material pode ser usado como um absorvedor sonoro. Para tal, recorreu-se a catálogos de algumas empresas que fabricam materiais acústicos e recolheram-se os dados relativos aos coeficientes de absorção sonora por eles indicados. Desta forma, elaborou-se a tabela 13 onde estão apresentados todos os dados por reunidos.

Tabela 14 – Dados recolhidos com os coeficientes de absorção sonora de materiais acústicos

| Material | Frequências (Hz) | | | | | |
|--|------------------|------|------|------|------|------|
| | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 |
| PCM estudado | 0,22 | 0,16 | 0,11 | 0,08 | 0,09 | 0,10 |
| Lã de rocha 50mm 70 Kg/m ³ | 0,19 | 0,40 | 0,90 | 1,00 | 1,00 | 1,00 |
| Lã de vidro 50mm 35 Kg/m ³ | 0,18 | 0,59 | 1,03 | 1,10 | 1,02 | 0,97 |
| Espuma de poliuretano 30 mm 30Kg/m ³ | 0,10 | 0,25 | 0,48 | 0,66 | 0,79 | 0,92 |
| Aglomerado de cortiça 20mm 30Kg/m ³ | 0,10 | 0,04 | 0,07 | 0,40 | 0,70 | 0,80 |

A tabela 13 permitiu, de uma forma abrangente, ter uma base de comparação entre o PCM estudado e outros materiais acústicos correntemente aplicados em edifícios.

Para melhor perceção dados recolhidos e de forma a poder-se tirar conclusões construiu-se o seguinte gráfico:

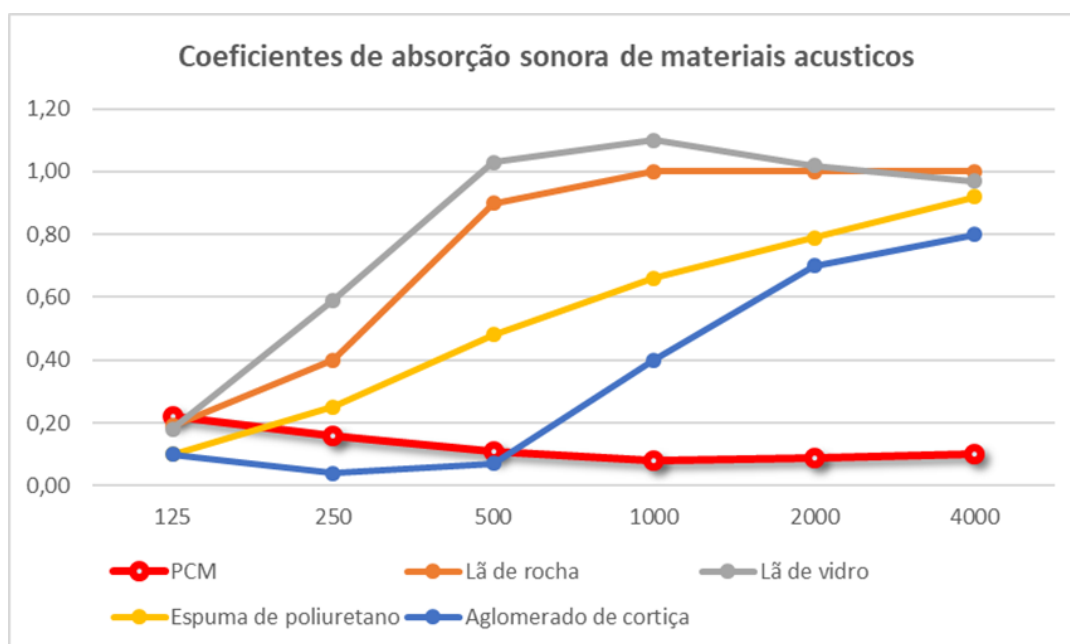


Figura 39 – Gráfico de comparação dos coeficientes de absorção sonora do PCM estudado com materiais acústicos

Após a análise do gráfico da fig.39 conclui-se que o PCM apresenta um desempenho acústico bastante positivo para as frequências da ordem dos 125 Hz, ou seja, nas frequências muito baixas. Com um coeficiente de absorção sonora da ordem dos 0,20 para a frequência de 125 Hz supera os tradicionais materiais acústicos. Isto pode ser explicado pela existência de zonas liquefeitas que podem funcionar como membrana sendo que só se poderia confirmar com a realização de mais medições em diferentes fases (sólida/líquida) e analisar os resultados.

Para as frequências mais elevadas os resultados já não são os mesmos, os níveis de absorção do PCM tendem a diminuir e os dos restantes materiais tendem a aumentar. Com um coeficiente de absorção

sonora na ordem dos 0,10, o material de mudança de fase não tem concorrência possível para os restantes materiais que possuem índices superiores aos 0,60 chegando alguns mesmo a superar a unidade.

Posto isto, conclui-se que o PCM não pode ser utilizado como um material de isolamento acústico pois as suas propriedades não permitem bons desempenhos, contudo apresenta uns valores satisfatórios nas baixas frequências para um material que possui propriedades térmicas, podendo até dar um pequeno auxílio, quando incorporado com outros materiais, a melhorar os níveis de absorção sonora no edifício.

4.5.3.COMPARAÇÃO DO PCM ENSAIADO COM MATERIAIS CORRENTES UTILIZADOS NA CONSTRUÇÃO

Procedeu-se à recolha de valores já tabelados dos coeficientes de absorção sonora para as frequências, de banda de oitava, de vários materiais utilizados na construção de edifício (como o betão, a madeira, as argamassas o vidro, entre outros). Na tabela 14 estão expostos os resultados recolhidos.

Tabela 15 – Dados recolhidos dos coeficientes de absorção sonora de materiais correntes na construção

| Material | Frequências (Hz) | | | | | |
|--|------------------|------|------|------|------|------|
| | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 |
| PCM estudado | 0,22 | 0,16 | 0,11 | 0,08 | 0,9 | 0,10 |
| Betão, alvenaria de tijolo rebocada | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,02 | 0,02 | 0,03 |
| Gesso cartonado 13 mm, 10 cm caixa de ar | 0,08 | 0,11 | 0,05 | 0,03 | 0,02 | 0,03 |
| Madeira 10 mm, 10 cm caixa de ar | 0,3 | 0,25 | 0,20 | 0,17 | 0,15 | 0,10 |
| Argamassa | 0,11 | 0,09 | 0,07 | 0,05 | 0,05 | 0,05 |
| Reboco áspero, cal | 0,03 | 0,03 | 0,03 | 0,03 | 0,04 | 0,07 |
| Pavimento rígido cerâmico | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,02 | 0,02 |
| Linóleo/vinílico em pavimento rígido | 0,02 | 0,02 | 0,03 | 0,04 | 0,04 | 0,05 |
| Janela de vidro 10mm | 0,35 | 0,25 | 0,18 | 0,12 | 0,05 | 0,02 |
| Porta de madeira 4 cm | 0,12 | 0,1 | 0,09 | 0,08 | 0,04 | 0,04 |

Com os dados da tabela 14 elaborou-se um gráfico para facilitar a comparação entre os dados. No gráfico da figura 40 estão representados os valores dos coeficientes de absorção sonora do PCM analisado e de alguns materiais utilizados na construção de edifícios.

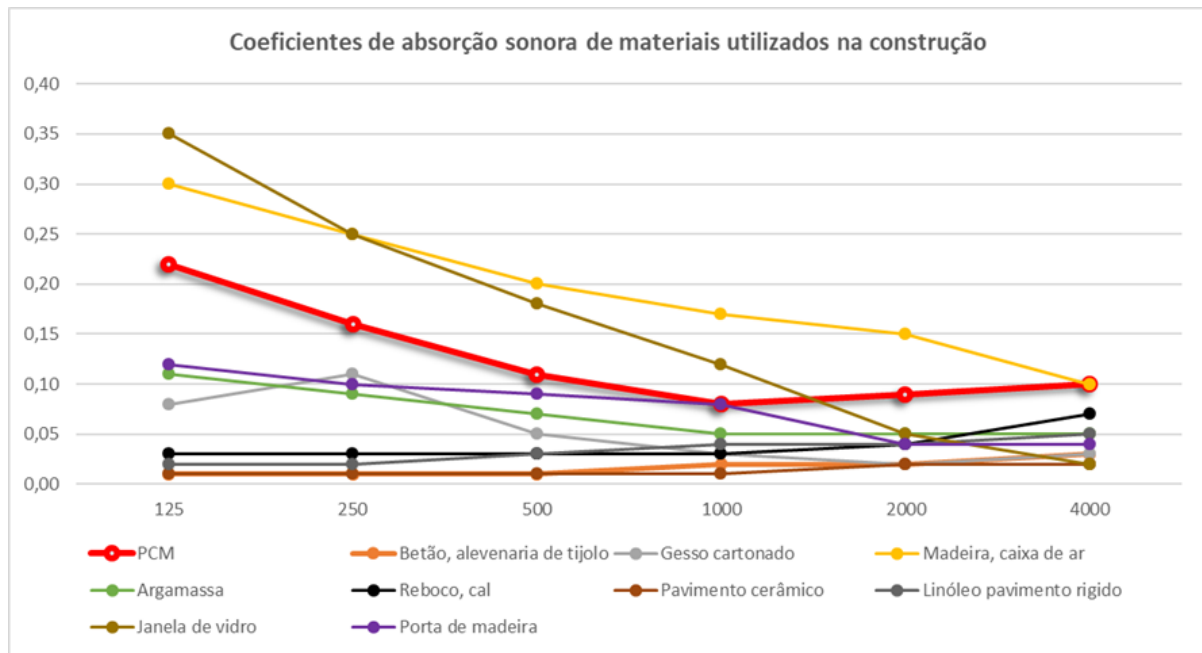


Figura 40 - Gráfico de comparação dos coeficientes de absorção sonora do PCM estudado com materiais correntes na construção

Analisando o gráfico da figura 40 conclui-se que o PCM apresenta, para as baixas frequências, um desempenho bastante superior aos restantes materiais sendo apenas superado pela madeira com caixa de ar e as janelas que apresentam coeficientes de absorção sonora superior 0,30 nas frequências dos 125 Hz.

Relativamente às frequências altas, onde se verifica que existe uma quebra nas propriedades de absorção sonora do PCM, continua a apresentar um desempenho superior á maioria dos materiais que apresentam uma percentagem da absorção da radiação na ordem dos 5%.

Constata-se assim, que o PCM apresenta um comportamento positivo quando comparado com os outros materiais de construção. Contudo, apesar desses resultados serem positivos quando comparados com outros materiais de construção não se pode esquecer que os seus níveis de absorção sonora são baixos, pois os seus coeficientes de absorção sonora são superam os $\alpha = 0,25$.

O PCM quando incorporado com outros materiais poderá conferir propriedades acústicas superiores às que por si só os materiais não conseguiriam adquirir e dessa forma melhorar os níveis de absorção sonora de um edifício. O gesso cartonado incorporado com PCM é um bom exemplo, pois os coeficientes do gesso cartonado não superam os $\alpha = 0,05$ dando o PCM um pequeno auxílio nas propriedades de absorção sonora já que este possuiu coeficientes de absorção sonora superiores.

4.6. SÍNTESE CRÍTICA

Na avaliação dos resultados obtidos é importante ter em conta que só foi analisada a absorção sonora com o PCM no estado sólido, sendo que, com a mudança do estado sólido para líquido as propriedades acústicas seriam diferentes. De notar, que apenas foi analisada uma amostra e que os resultados obtidos expressam de uma forma muito geral o que pode ser o comportamento de um material de mudança de fase. Também, os dados recolhidos dos coeficientes de absorção sonora dos materiais utilizados na construção eram tabelados pelos fabricantes, desta forma, para o mesmo material poderá haver pequenas

variações nos valores consoante os diferentes produtores do material, sendo que os valores apresentados expressavam de um modo geral o que eram as suas propriedades.

Assim, considero positivo todo o trabalho experimental aqui realizado pois conseguiu-se, de um modo abrangente, ter-se noções do que pode ser o comportamento acústico de um material com propriedades térmicas (PCM), tema ainda muito pouco explorado.

5

CONCLUSÕES

5.1. CONCLUSÕES GERAIS

O trabalho desenvolvido nesta tese permitiu, numa primeira parte, analisar o desempenho térmico dos PCM em edifícios quando incorporados em materiais construtivos. Com os exemplos apresentados, das aplicações dos PCM para arrefecimento e aquecimento de edifícios, foi possível perceber o contributo destes materiais para a conservação das temperaturas interiores na gama das temperaturas de conforto através da redução de picos diários de temperatura, estabilizações das flutuações das temperaturas interiores e o aumento do desfasamento entre picos da temperatura exterior e os picos de temperatura interior.

Numa segunda parte, onde se ensaiou em laboratório uma amostra de PCM no tubo de ondas estacionárias, foi possível observar o comportamento acústico deste material, tema ainda muito pouco desenvolvido por investigadores.

Estabeleceram-se objetivos parciais desenvolvidos nos vários capítulos, dos quais se retiraram as conclusões apresentadas neste capítulo.

- A apresentação do estado de arte, sobre os materiais de mudança de fase, no capítulo 2, permitiu:
- A introdução de conceitos essenciais no estudo do problema da transferência de calor associado aos PCM;
- A identificação dos vários tipos de PCM e a sua divisão em classes e categorias;
- Apresentação das características-chave na seleção do PCM mais adequado a incorporar num edifício, destacando-se as propriedades térmicas, nomeadamente a temperatura de fusão, como critério principal;
- Enumeração das várias formas de incorporação de PCM em materiais de construção, tais como a impregnação, imersão e encapsulamento, e a sua introdução em elementos construtivos.

No terceiro capítulo apresentaram-se exemplos práticos de casos onde os PCM foram aplicados em edifícios o que permitiu:

- Compreender como os PCM auxiliam no arrefecimento e no aquecimento passivo de edifícios;
- Analisar o desempenho térmico dos PCM e concluir que as suas temperaturas de fusão, ocorrentes às temperaturas de utilização dos edifícios, tornam este material um eficiente armazenador de calor;
- Perceber como se poderá poupar energia num edifício com a incorporação destes materiais através da redução de picos de temperatura;
- Ter uma melhor perceção de que é uma área que está em desenvolvimento e que poderá ser uma solução bastante viável no futuro próximo.

O estudo experimental desenvolvido no capítulo 4 com recurso a um tubo de ondas estacionárias, permitiu:

- O estudo do comportamento acústico de um material que possui características térmicas, o PCM, tem ainda muito pouco explorado por investigadores;
- A caracterização do coeficiente de absorção sonora do PCM em diferentes frequências;

- A comparação dos coeficientes de absorção sonora do PCM com materiais acústicos e a conclusão de que o material de mudança de fase não possui propriedades suficientes para funcionar como bom “absorvente” sonoro;
- A comparação dos coeficientes de absorção sonora do PCM com materiais utilizados correntemente na construção e a percepção de que o PCM apresenta níveis de absorção sonora superiores aos betões, argamassas, gesso cartonado, reboco áspero, pavimentos cerâmico e linóleo e portas de madeiras, no entanto a absorção sonora é inferior à registada pelos materiais utilizados como isolantes acústicos (lã de rocha, lã de vidro, espuma de poliuretano, aglomerados de cortiça).
- A utilização de PCM, embora ainda muito pouco ligada à construção e utilização de edifícios em Portugal, perspectiva-se de grande importância pois as necessidades de conforto crescem e com isso deseja-se que os gastos derivados do consumo de energia sejam os menores possíveis.

A incorporação em materiais ou componentes tradicionalmente utilizados na construção facilita a introdução dos PCM não havendo necessidade de adaptar técnicas construtivas já dominadas, fazendo assim um forte motivo para que entidades apostem no fabrico de novos materiais com o PCM na sua constituição.

Tendo em conta os casos práticos de aplicações de PCM aqui apresentados, sugere-se que a aplicação de PCM na construção em Portugal seja feita com intuito de reduzir picos de temperaturas interiores, em dias que apresentem temperaturas mais extremas, e atenuar as flutuações de temperaturas nos restantes dias tanto na estação de aquecimento como na de arrefecimento, face as diversidades do clima exterior.

Relativamente ao estudo acústico realizado deu-se como positivo todo trabalho aqui efetuado. A obtenção do coeficiente de absorção sonora do material permitiu caracterizar o material numa área que ainda pouco ou nada tinha sido investigada.

Assim, relembro que o PCM se apresenta como um material com características térmicas sendo a investigação na área acústica um complemento que pode ser desenvolvido a fim de criar novos materiais com propriedades mais equilibradas e contribuir desta forma para a melhoria do conforto interno dos edifícios.

5.2. SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

No seguimento do trabalho realizado na dissertação e tendo consciência das dificuldades enfrentadas, enunciam-se algumas sugestões para trabalhos futuros:

- Verificação experimental das características acústicas de uma maior diversidade de amostras de PCM através de diferentes métodos;
- Estudo dos níveis de absorção sonora de novos materiais compostos por PCM com diferentes características e compará-los a esses mesmos materiais sem o PCM incorporado;
- Estudo das propriedades acústicas de componentes com PCM (painéis de gesso cartonado, tetos falsos, etc.) aplicados a uma câmara acústica.

Por fim, tendo em conta que a temática dos materiais de mudança de fase com aplicação na indústria da construção se encontra num processo de desenvolvimento sugere-se um incentivo para que este projeto continue a evoluir e assim, num futuro próximo, possamos usufruir nas edificações de melhores condições de conforto com menor consumo de energia e assim um menor impacto ambiental.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABHAT, A. (1983) - Low temperature latent heat thermal energy storage: Heat storage materials. *Solar Energy* [Em linha]. 30:4. 313-332. Disponível em WWW: <URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0038092X8390186X>>. ISSN 0038-092X.
- ALAWADHI, Esam M. (2008) - Thermal analysis of a building brick containing phase change material. *Energy and Buildings* [Em linha]. 40:3. 351-357. Disponível em WWW: <URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778807000953>>. ISSN 0378-7788.
- ÁLVAREZ, Servando [et al.] (2013) - Building integration of PCM for natural cooling of buildings. *Applied Energy* [Em linha]. 109: 514-522. Disponível em WWW: <URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261913000998>>. ISSN 0306-2619.
- ATHIENTIS, A. K.; CHEN, Y. (2000) - The effect of solar radiation on dynamic thermal performance of floor heating systems. *Solar Energy* [Em linha]. 69:3. 229-237. Disponível em WWW: <URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X00000529>>. ISSN 0038-092X.
- ATHIENTIS, A. K. [et al.] (1997) - Investigation of the thermal performance of a passive solar test-room with wall latent heat storage. *Building and Environment* [Em linha]. 32:5. 405-410. Disponível em WWW: <URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132397000097>>. ISSN 0360-1323.
- AUCKAILI, Amar; FARID, Mohammed (2004) - A review on energy conservation in building applications with thermal storage by latent heat using phase change materials.
- BENTZ, Dale P.; TURPIN, Randy (2007) - Potential applications of phase change materials in concrete technology. *Cement and Concrete Composites* [Em linha]. 29:7. 527-532. Disponível em WWW: <URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0958946507000698>>. ISSN 0958-9465.
- BORREGUERO, Ana M. [et al.] (2011) - Thermal testing and numerical simulation of gypsum wallboards incorporated with different PCMs content. *Applied Energy* [Em linha]. 88:3. 930-937. Disponível em WWW: <URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261910003302>>. ISSN 0306-2619.
- BOURDEAU, L.E. (1980) - Study of two passive solar systems containing phase change materials for thermal storage. [Em linha].
- CABEZA, Luisa F. [et al.] (2007) - Use of microencapsulated PCM in concrete walls for energy savings. *Energy and Buildings* [Em linha]. 39:2. 113-119. Disponível em WWW: <URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778806001046>>. ISSN 0378-7788.
- CERÓN, Isabel; NEILA, Javier; KHAYET, Mohamed (2011) - Experimental tile with phase change materials (PCM) for building use. *Energy and Buildings* [Em linha]. 43:8. 1869-1874. Disponível em WWW: <URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778811001095>>. ISSN 0378-7788.
- CHANDRA, S. [et al.] (1985) - Thermal performance of a non-air-conditioned building with PCCM thermal storage wall. *Energy Conversion and Management* [Em linha]. 25:1. 15-20. Disponível em WWW: <URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0196890485900640>>. ISSN 0196-8904.
- CHOU, Huann-Ming; CHEN, Chang-Ren; NGUYEN, Vu-Lan (2013) - A new design of metal-sheet cool roof using PCM. *Energy and Buildings* [Em linha]. 57: 42-50. Disponível em WWW: <URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778812005397>>. ISSN 0378-7788.
- EVERS, Angela C.; MEDINA, Mario A.; FANG, Yuan (2010) - Evaluation of the thermal performance of frame walls enhanced with paraffin and hydrated salt phase change materials using a dynamic wall simulator. *Building and Environment* [Em linha]. 45:8. 1762-1768. Disponível em WWW: <URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S036013231000051X>>. ISSN 0360-1323.
- HUNGER, Martin [et al.] (2009) - The direct incorporation of micro-encapsulated Phase Change Materials in the concrete mixing process - A feasibility study.
- KAASINEN, H. (1992) - The absorption of phase change substances into commonly used building materials. *Solar Energy Materials and Solar Cells* [Em linha]. 27:2. 173-179. Disponível em WWW: <URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0927024892901189>>. ISSN 0927-0248.

- KUZNIK, Frédéric; VIRGONE, Joseph; ROUX, Jean-Jacques (2008) - Energetic efficiency of room wall containing PCM wallboard: A full-scale experimental investigation. Energy and Buildings [Em linha]. 40:2. 148-156. Disponível em WWW: <URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778807000643>>. ISSN 0378-7788.
- LIN, Kunping [et al.] (2005) - Experimental study of under-floor electric heating system with shape-stabilized PCM plates. Energy and Buildings [Em linha]. 37:3. 215-220. Disponível em WWW: <URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S037877880400180X>>. ISSN 0378-7788.
- MONDAL, Subrata (2008) - Phase change materials for smart textiles – An overview.
- PARK, Ji Hun [et al.] (2019) - Comparative analysis of the PCM application according to the building type as retrofit system. Building and Environment [Em linha]. 151: 291-302. Disponível em WWW: <URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132319300848>>. ISSN 0360-1323.
- PIRES, Luis; SILVA, Pedro; CASTRO-GOMES, João (2005) - A importância do consumo energético dos edifícios na Europa: soluções propostas para a sua redução.
- SÁ, Ana Margarida Vaz (2013) - Sustentabilidade na construção: comportamento térmico de edifícios em Portugal usando materiais de mudança de fase.
- SCALAT, S. [et al.] (1996) - Full scale thermal testing of latent heat storage in wallboard. Solar Energy Materials and Solar Cells [Em linha]. 44:1. 49-61. Disponível em WWW: <URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0927024896000177>>. ISSN 0927-0248.
- SHILEI, Lv; NENG, Zhu; GUOHUI, Feng (2006) - Impact of phase change wall room on indoor thermal environment in winter. Energy and Buildings [Em linha]. 38:1. 18-24. Disponível em WWW: <URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778805000472>>. ISSN 0378-7788.
- SHUKLA, Anant; BUDDHI, D.; SAWHNEY, R. L. (2008) - Thermal cycling test of few selected inorganic and organic phase change materials.
- ZHANG, Yinping [et al.] (2008) - Thermal storage and nonlinear heat-transfer characteristics of PCM wallboard. Energy and Buildings [Em linha]. 40:9. 1771-1779. Disponível em WWW: <URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778808000674>>. ISSN 0378-7788.

<https://www.sotecnisol.pt/> - 10 de Maio de 2019

<https://www.masterferro.pt> – 15 de Maio 2019

<https://www.rubitherm.eu/en/index.php/productcategory/organische-pcm-rt> - 27 de Maio de 2019

ANEXOS

ANEXO A

| Ensaio 1 | | | | |
|-----------------|------------|------------|-------|----------|
| Frequência (Hz) | P máx (dB) | P min (dB) | Sn | α |
| 125 | 86,5 | 68,4 | 8,04 | 0,39 |
| 250 | 90,9 | 74,5 | 6,61 | 0,46 |
| 500 | 81,5 | 56,4 | 17,99 | 0,20 |
| 1000 | 87,5 | 53,3 | 51,29 | 0,08 |
| 2000 | 61,8 | 30,4 | 37,15 | 0,10 |
| 4000 | 56,1 | 30,6 | 18,84 | 0,19 |

| Ensaio 2 | | | | |
|-----------------|------------|------------|-------|----------|
| Frequência (Hz) | P máx (dB) | P min (dB) | Sn | α |
| 125 | 86,8 | 68,5 | 8,22 | 0,39 |
| 250 | 91,2 | 74,2 | 7,08 | 0,43 |
| 500 | 81,4 | 57,8 | 15,14 | 0,23 |
| 1000 | 87,3 | 53 | 51,88 | 0,07 |
| 2000 | 61,8 | 30,2 | 38,02 | 0,10 |
| 4000 | 55,8 | 30,5 | 18,41 | 0,20 |

| Ensaio 3 | | | | |
|-----------------|------------|------------|-------|----------|
| Frequência (Hz) | P máx (dB) | P min (dB) | Sn | α |
| 125 | 88,9 | 65 | 15,67 | 0,23 |
| 250 | 94 | 67,2 | 21,88 | 0,17 |
| 500 | 83,5 | 53 | 33,50 | 0,11 |
| 1000 | 76,7 | 43 | 48,42 | 0,08 |
| 2000 | 67 | 35,5 | 37,58 | 0,10 |
| 4000 | 65,4 | 34 | 37,15 | 0,10 |

| Ensaio 4 | | | | |
|-----------------|------------|------------|-------|----------|
| Frequência (Hz) | P máx (dB) | P min (dB) | Sn | α |
| 125 | 88,8 | 64,8 | 15,85 | 0,22 |
| 250 | 94,1 | 66,9 | 22,91 | 0,16 |
| 500 | 83,8 | 53,2 | 33,88 | 0,11 |
| 1000 | 76,5 | 42,8 | 48,42 | 0,08 |
| 2000 | 67,1 | 35 | 40,27 | 0,09 |
| 4000 | 65,3 | 33,9 | 37,15 | 0,10 |

| Ensaio 5 | | | | |
|-----------------|------------|------------|-------|----------|
| Frequência (Hz) | P máx (dB) | P min (dB) | Sn | α |
| 125 | 89 | 64,9 | 16,03 | 0,22 |
| 250 | 93,9 | 66,8 | 22,65 | 0,16 |
| 500 | 83,9 | 53,1 | 34,67 | 0,11 |
| 1000 | 76,7 | 42,7 | 50,12 | 0,08 |
| 2000 | 67,3 | 35,1 | 40,74 | 0,09 |
| 4000 | 65,7 | 33,5 | 40,74 | 0,09 |

PAINEL COBERLAN

N50 - N75 - B50 - B75

Densidade Nominal 150 - 175 Kg/m³

Dados Técnicos

| | | | | | | | | |
|------------------|------------------------|------|----|----|----|----|----|-----|
| Espessura (mm) | NP EN 822 NP EN 822 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 100 |
| Comprimento (mm) | | 1200 | | | | | | |
| Largura (mm) | EN 823 | 1000 | | | | | | |

Valor declarado de Condutibilidade Térmica: λ_D : 0,035 W / mK

NORMA: EN 12667 e EN 12939

Tolerâncias:

ESPESSURA Classe T5 de -1% até -1mm a -3 mm.

COMPRIMENTO \pm 2%

LARGURA \pm 1,5%

Resistência Térmica R_D

| | | | | | | | |
|------------------------|------|------|------|------|------|------|------|
| Espessura (mm) | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 100 |
| R (m ² K/W) | 0.75 | 1.05 | 1.30 | 1.55 | 1.80 | 2.10 | 2.60 |

NORMA: EN 12667 e EN 12939

Reacção ao fogo

N 50 E N 75 Incombustível - **Euroclasse A1**

B 50 E B 75 Indeterminado - **Euroclasse F**

NORMA: EN 13501-1
EN ISO 1182

Absorção de Água

$W_s \leq 1.00 \text{ Kg/m}^2$

NORMA: NP EN 1609

Factor de Difusão ao Vapor de Água

μ : 1,3

NORMA: BS 2972

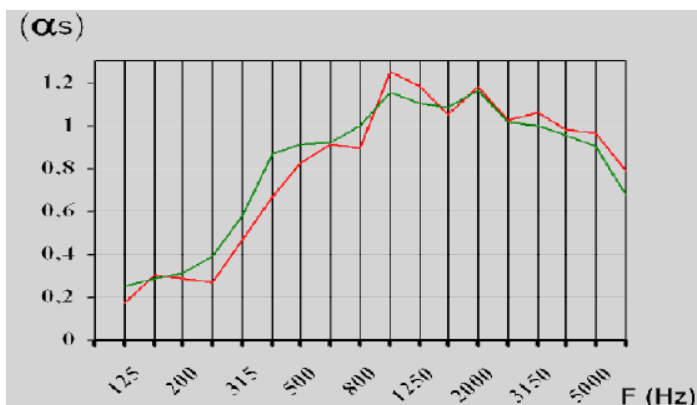
Sede – Lisboa:
Rua do Ferro
Fetais
2681 - 502 Camarate
Tel. +351 219 488 400
Fax +351 219 470 490

Delegação Porto:
Zona Industrial da Maia 1 Sector II
Rua de Amadeu Costa
4475 - 191 Gemunde
Tel. +351 229 478 580
Fax +351 229 489 966

Delegação Coimbra:
Lugar do Brejo
Estrada da Ponte – Armazém A
3040 – 575 Antanhol
Tel. +351 239 445 594
Fax +351 239 443 356

Delegação Algarve:
Zona Industrial de Olhão
Lote 237
8700 – 281 Olhão
Tel. +351 289 705 429
Fax +351 289 707 114

Delegação Ilhas:
Apartado 2711
9001 - 401 Funchal
Tel. +351 916 616 968
Fax +351 219 476 901



— N50 - B50 — N75 - B75

Coefficiente de Absorção Acústica: α_s :

| 50 mm | F (Hz) | 100 | 125 | 160 | 200 | 250 | 315 | 400 | 500 | 630 |
|--------------|------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| N 50 B 50 | α_s | 0.08 | 0.15 | 0.29 | 0.55 | 0.67 | 0.85 | 0.99 | 1.08 | 1.13 |
| N 75 B 50 | α_s | 0.10 | 0.19 | 0.31 | 0.58 | 0.70 | 0.87 | 1.00 | 1.07 | 1.10 |
| 50 mm | F (Hz) | 800 | 1000 | 1250 | 1600 | 2000 | 2500 | 3150 | 4000 | 5000 |
| N 50 B 50 | α_s | 1.20 | 1.18 | 1.10 | 1.16 | 1.03 | 1.06 | 1.02 | 1.02 | 0.96 |
| N 75 B 50 | α_s | 1.15 | 1.10 | 1.08 | 1.16 | 1.08 | 1.05 | 1.01 | 0.96 | 0.93 |

Área de Absorção equivalente: α_w :

$\alpha_w = 0.75$ (MH) Classe C

Características Físicas:

| | | |
|--|---|-------------|
| ESQUADRIA | Desvio Comprimento / largura < 5 mm/m | NP EN 824 |
| PLANEZA | Flecha ≤ 6 mm | NP EN 825 |
| ESTABILIDADE DIMENSIONAL | 23°C / 90% HR: As variações relativas (larg. $\Delta\epsilon_l$ e comp. $\Delta\epsilon_c$) não excedem 0.0% | NP EN 1604 |
| | 70°C / 50% HR: As variações relativas (larg. $\Delta\epsilon_l$ e comp. $\Delta\epsilon_c$) não excedem 0.0% | NP EN 1604 |
| RESISTÊNCIA À TRACÇÃO PARALELA ÀS FACES | N 50 / B 50 - 160 kPa N 75 / B 75 - 170 kPa | NP EN 1608 |
| RESISTÊNCIA À TRACÇÃO PERPENDICULAR | N 50 / B 50 ≥ 9 kPa N 75 / B 75 ≥ 15 kPa | NP EN 1607 |
| TENSÃO DE COMPRESSÃO σ_{10} | N 50 / B 50 ≥ 50 kPa N 75 / B 75 ≥ 75 kPa | NP EN 826 |
| DEFORMAÇÃO SOB CARGA PONTUAL | N 50 / B 50 ≥ 740 kPa N 75 / B 75 ≥ 950 kPa | PR EN 12430 |

Sede – Lisboa:
Rua do Ferro
Fetais
2681 - 502 Camarate
Tel. +351 219 488 400
Fax +351 219 470 490

Delegação Porto:
Zona Industrial da Maia 1
Sector 1
4475 - 132 Gemunde
Tel. +351 229 478 580
Fax +351 229 489 966

Delegação Coimbra:
Lugar do Brejo
Estrada da Ponte – Armazém A
3040 – 575 Antanhol
Tel. +351 239 445 594
Fax +351 239 443 356

Delegação Algarve:
Zona Industrial de Olhão
Lote 237
8700 – 281 Olhão
Tel. +351 289 705 429
Fax +351 289 707 114

Delegação Ilhas:
Apartado 2711
9001 - 401 Funchal
Tel. +351 916 616 968
Fax +351 219 476 901

Lã de Rocha: MN 230 – MK 230 – MA 230

Dados Técnicos:

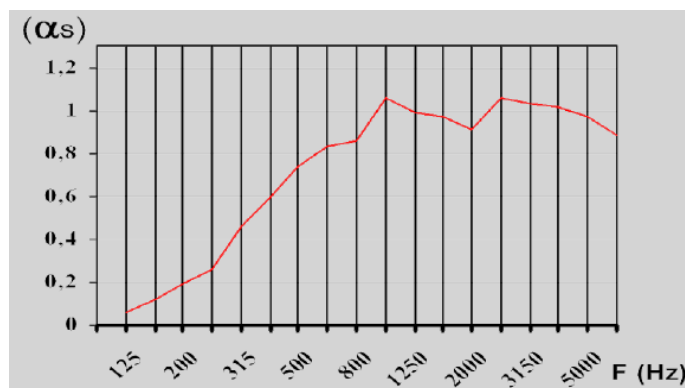
| Propriedades | | | | | | | Norma |
|--|--|------|----|------|------|-----|------------------------|
| Espessura | 50 | 60 | 70 | 80 | 100 | 120 | NP EN 822 |
| Comprimento | 1000 | 8000 | | 6000 | 5000 | | NP EN 822 |
| Largura | 12000 | | | | | | EN 823 |
| Valor declarado de Condutibilidade Térmica: λD | 0,038 W / mK | | | | | | EN 12667 e EN 12939 |
| Reação ao fogo | MN 230 e MA 230: Incombustível - Euroclasse A1 MK 230: Indeterminado - Euroclasse F | | | | | | EN 13501-1 EN 12939 |
| Absorção à Água | Ws ≤ 1.00 Kg/m² | | | | | | NP EN 1609 |
| Fator de Difusão ao Vapor de Água | μ: 1,3 | | | | | | BS 2972 |

Tolerâncias:

| Propriedades | |
|--------------|--|
| Espessura | Classe T1 de -5% até -5mm a + excesso permitido. |
| Comprimento | $\pm 2\%$ |
| Largura | $\pm 1,5\%$ |

Resistência Térmica R_D

| Propriedades | | | | | | | Norma |
|------------------------|------|------|------|------|------|------|-----------|
| Espessura (mm) | 50 | 60 | 70 | 80 | 100 | 120 | NP EN 822 |
| R (m ² K/W) | 1.30 | 1.55 | 1.80 | 2.10 | 2.60 | 3.15 | EN 12939 |



Coefficiente de Absorção Acústica: α_s :

| Propriedades | | | | | | | | | | |
|--------------|------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| mm | F (Hz) | 100 | 125 | 160 | 200 | 250 | 315 | 400 | 500 | 630 |
| 50 | α_s | 0.06 | 0.12 | 0.19 | 0.26 | 0.46 | 0.60 | 0.74 | 0.83 | 0.88 |
| mm | F (Hz) | 800 | 1000 | 1250 | 1600 | 2000 | 2500 | 3150 | 4000 | 5000 |
| 50 | α_s | 1.06 | 0.99 | 0.97 | 0.91 | 1.06 | 1.03 | 1.01 | 0.97 | 0.88 |

Área de Absorção equivalente: $\alpha_w: \alpha_w = 0.54(\text{MH})$ Classe D

A Sotecnisol, S.A. reserva-se ao direito de alterar esta ficha técnica sem aviso prévio.

Data de Edição: Março de 2016



SEDE - LISBOA:

Rua do Ferro – Fetais
2681-502 Camarate
Tel.: +351 219 488 400
Fax: +351 219 470 490
Nº Azul: 808 202 363

DELEGAÇÃO PORTO:

Zona Industrial da Maia 1 Sector II
Rua de Amadeu Costa
4475-191 Gemunde
Tel.: +351 229 478 580
Fax: +351 229 489 966

DELEGAÇÃO COIMBRA:

Lugar do Brejo
Estrada da Ponte – Armazém A
3040-575 Antanhol
Tel.: +351 239 445 594
Fax: +351 239 443 356

DELEGAÇÃO ALGARVE:

Zona Industrial de Olhão
Lote 237
8700-281 Olhão
Tel.: +351 289 705 429
Fax: +351 289 707 114

Características Físicas:

Propriedades

| | |
|--|---|
| Permeabilidade ao vapor de água | 0,4 g / m3. 24h (Valor dependente do alumínio do revestimento) |
| Estabilidade Dimensional | 23°C / 90% HR: As variações relativas (larg. Δℓ e comp. Δℓ c) não excedem 0.0%. |
| Resistência à tração paralela às faces | MK 230 - 18kPa MN 230 - 8 kPa MA 230 - 25 kPa. |



SEDE - LISBOA:

Rua do Ferro – Fetais
2681-502 Camarate
Tel.: +351 219 488 400
Fax: +351 219 470 490
Nº Azul: 808 202 363

DELEGAÇÃO PORTO:

Zona Industrial da Maia 1 Sector II
Rua de Amadeu Costa
4475-191 Gemunde
Tel.: +351 229 478 580
Fax: +351 229 489 966

DELEGAÇÃO COIMBRA:

Lugar do Brejo
Estrada da Ponte – Armazém A
3040-575 Antanhol
Tel.: +351 239 445 594
Fax: +351 239 443 356

DELEGAÇÃO ALGARVE:

Zona Industrial de Olhão
Lote 237
8700-281 Olhão
Tel.: +351 289 705 429
Fax: +351 289 707 114

RT18HC



RUBITHERM® RT is a pure PCM, this heat storage material utilising the processes of phase change between solid and liquid (melting and congealing) to store and release large quantities of thermal energy at nearly constant temperature. The RUBITHERM® phase change materials (PCM's) provide a very effective means for storing heat and cold, even when limited volumes and low differences in operating temperature are applicable.

We look forward to discussing your particular questions, needs and interests with you.

Properties for RT-line:

- high thermal energy storage capacity
- heat storage and release take place at relatively constant temperatures
- no supercooling effect, chemically inert
- long life product, with stable performance through the phase change cycles
- melting temperature range between -9 °C and 100 °C available

The most important data:

Melting area

Congeeing area

Heat storage capacity ± 7,5%

Combination of latent and sensible heat in a temperatur range of 11°C to 26°C.

Specific heat capacity

Density solid

at 15 °C

Density liquid

at 25 °C

Heat conductivity (both phases)

Volume expansion

Flash point

Max. operation temperature

Typical Values

17-19 [°C]

main peak: 18

19-17 [°C]

main peak: 17

260 [kJ/kg]*

72 [Wh/kg]*

2 [kJ/kg·K]

0,88 [kg/l]

0,77 [kg/l]

0,2 [W/(m·K)]

12,5 [%]

135 [°C]

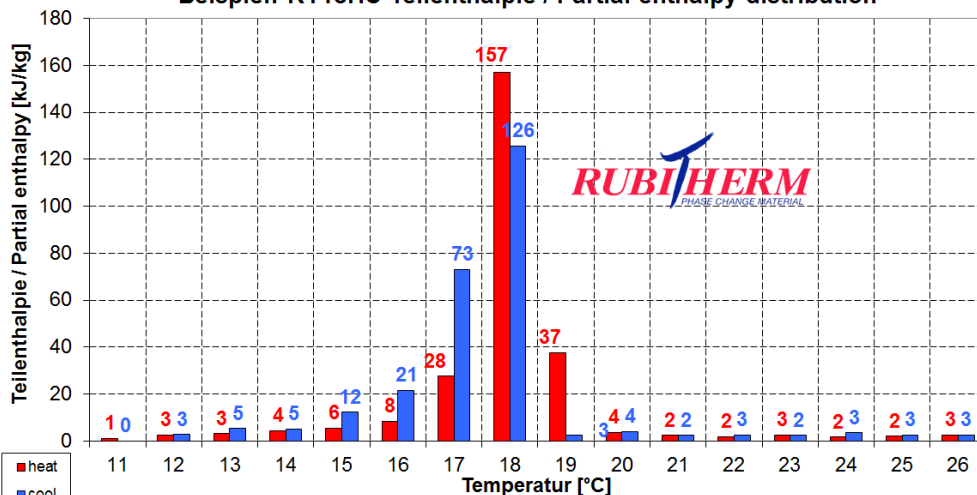
50 [°C]



GHS08

H304: May be fatal if swallowed and enters airways.

Beispiel: RT18HC Teilenthalpie / Partial enthalpy distribution



*Measured with 3-layer-calorimeter.

Rubitherm Technologies GmbH
 Imhoffweg 6
 D-12307 Berlin
 Tel: +49 (30) 7109622-0
 Fax: +49 (30) 7109622-22
 E-Mail: info@rubitherm.com
 Internet: www.rubitherm.com

The product information given is a non-binding planning aid, subject to technical changes without notice. Version:

06.08.2018